

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ –
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**
Hornicko – geologická fakulta
Institut geoinformatiky

**PREDPOKLADY RELIÉFU DOLINY ŠÚTOVSKÉHO
POTOKA PRE VZNIK LAVÍN**

bakalárska práca

Autor:

Patrik Babiš

Vedúci bakalárskej práce:

Mgr. Ing. Jozef Richnavský

Ostrava 2011

Pod'akovanie

Úvodom by som chcel vysloviť veľké pod'akovanie za odbornú pomoc a trpezlivosť pri konzultáciách vedúcemu bakalárskej práce Mgr.Ing. Jozefovi Richnavskému, Stredisku lavínovej prevencie Horskej záchranej služby v Jasnej za poskytnutie dát potrebných pre bakalársku prácu, Horskej záchranej službe Malá Fatra za poskytnutie meteorologických dát a Ing. Petrovi Borsányimu zo SHMÚ za ochotu pri poskytnutí dát. Veľká vďaka patrí aj spolužiakom a známym z Inštitútu geoinformatiky VŠB-TUO za cenné rady a podporu pri vykonaní práce a v neposlednom rade by som chcel pod'akovať rodičom za finančnú podporu počas môjho štúdia a psychickú podporu, bez ktorej by táto práca nevznikla. Všetkým veľká vďaka!

Patrik Babiš

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institút geoinformatiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Patrik Babiš**
Studijní program: B3646 Geodézie a kartografie
Studijní obor: 3646R006 Geoinformatika
Téma: **Předpoklady reliéfu vybrané horské oblasti pro vznik lavín**
Terrain Preconditions of the Chosen Mountain Region for Avalanche Initiation

Zásady pro vypracování:

1. Oboznámenie sa s problematikou mapovania lavínového rizika.
2. Výber záujmového územia.
3. Popis charakteru reliéfu záujmového územia.
4. Oboznámenie sa so spôsobmi určovania odtrhových zón.
5. Využitie nástrojov GIS na získanie potrebných vstupných dát do modelu.
6. Identifikácia potenciálnych odtrhových zón na základe zhodnotenia vybraných vlastností reliéfu.
7. Testovanie nástroja r.avalanche (GIS GRASS).

Seznam doporučené odborné literatury:

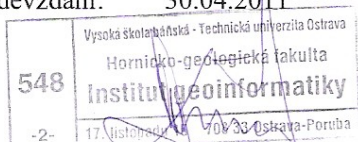
- [1] MCLUNG, David; SCHAEERER, Peter. The avalanche handbook. 3rd ed. Seattle, USA : The mountaineers book, 2006. 342 s. ISBN 978-0-89886-809-8.
- [2] El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A.: Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation and Applications. Artech house, London, 2005. 257 str.
- [3] MILAN, Ladislav. Lavíny v horstvách Slovenska. prvé vydanie. Bratislava : VEDA, Slovenská akadémia vied, 2006. 152 s. ISBN 80-224-0894-8.
- [4] LIZUCH, Milan. ABC lavín. prvé vydanie. [s.l.] : Horský internetový klub, 2009. 79 s. ISBN 978-80-970269-5-0.
- [5] BUZEK, L. Beskydy - příroda a vztahy k ostravské průmyslové oblasti. Ostrava : Pedagogická fakulta, 1986. 349 s.
- [6] HREŠKO, J. Ohrozenosť vysokohorskej krajiny v oblasti Tatier. In Acta Facultatis Stud. Hum. et Naturae Univ. Prešovensis : geographica 2, roč.XXIX. [s.l.] : [s.n.], 1998. s. 326-332.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Ing. Jozef Richnavský**

Datum zadání: 31.10.2010

Datum odevzdání: 30.04.2011



prof. Ing. Zdeněk Diviš, CSc.
vedoucí institutu



prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Prehlásenie

Celú bakalársku prácu vrátane príloh som vypracoval samostatne a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

Bol som oboznámený s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/200 Zb. – autorský zákon, predovšetkým §35 – využitím diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a využitím diela školského a § 60 – školské dielo.

Beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo neziskovo ku svojej vnútornej potrebe bakalársku prácu použiť. (§ 35 odst. 3).

Súhlasím s tým, že jeden výtlačok bakalárskej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO) k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho bakalárskej práce. Súhlasím s tým, že údaje o bakalárskej práci, obsiahnuté v Zázname záverečnej práci, umiestnené v prílohe mojej bakalárskej práce budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.

Bolo zjednané, že VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany uzavrie licenčnú zmluvu s oprávneným použitím diela v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bolo zjednané, že použiť svoje dielo – bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžu len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takom prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do jej skutočnej výšky).

V Ostrave dňa 20.4.2011

Patrik Babiš

Abstrakt

Vo vysokohorskom prostredí predstavujú lavíny nebezpečenstvo, ktoré značne ohrozuje život a zdravie ľudí a môže spôsobiť nemalé materiálne škody. Predikcia lavín a poznanie ich správania sa sú kľúčové v otázke lavínovej prevencie.

Bakalárska práca analyzuje poznatky lavínovej problematiky a zameriava sa na využitie geografických informačných systémov a digitálneho modelu reliéfu na odvodenie základných topografických parametrov a ich následné využitie pri identifikácii potenciálnych odtrhových zón. Tie sú potrebné pre nadväzujúce modelovanie lavínových dráh a dosahov pomocou dynamického lavínového modelu. Výstupy takéhoto modelovania sú v práci porovnávané a kombinované s reálnymi lavínovými udalosťami v záujmovej oblasti.

Ako pilotné územie bolo zvolené územie Šútovskej doliny v Krivánskej Malej Fatre, kde je lavínová prevencia značne opodstatnená, čo dokazujú mnohé lavínové javy zaznamenané v tejto oblasti v minulosti. Výsledky modelovania boli spresňované a kalibrované na základe reálnych údajov poskytnutých z databázy strediska lavínovej prevencie. Výstupom modelovania je mapa identifikujúca najrizikovejšie miesta z hľadiska vzniku potenciálnych lavínových odtrhov a analýza potenciálneho dosahu a dráhy lavíny pre zvolené parametre odtrhu.

Uskutočnená analýza a postup môže slúžiť ako vhodný koncept pri znižovaní lavínového rizika nielen v tejto oblasti, ale pri vhodnom nastavení parametrov môže byť využitá aj v iných, lavínami ohrozených oblastiach.

Kľúčové slová: lavína, digitálny model reliéfu, GIS, lavínové odtrhové zóny, lavínový dosah, lavínová dráha, RAMMS, Šútovská dolina

Abstract

In alpine environments avalanches constitute danger, which threatens life and health and can cause considerable material damage. Avalanche prediction and understanding of their behavior is crucial in terms of avalanche prevention.

The thesis analyzes the knowledge of avalanche issue and focuses on the use of geographic information systems and digital elevation model to derive the basic topographic parameters and their further usage in identifying potential avalanche release zones. These are necessary for the subsequent modeling of avalanche paths and run-outs using dynamic avalanche model. Outputs of this modeling are compared and combined with real avalanche events in the area of interest.

As a pilot area was chosen territory Sútovska valley Mala Fatra Kriván, where the avalanche prevention is highly justified, as demonstrated by the number of avalanche events recorded in this area in the past. Modeling results were specified and calibrated with

real data from the database provided by the Centre for avalanche prevention. Output of modelling is a map identifying the riskiest places in terms of potential avalanche breakaway and analysis of the potential reach and avalanche path for selected parameters of breakaway.

Performed analysis and approach can serve as a suitable concept in reducing avalanche risk not only in this area, but the appropriate parameter settings can be used also in other avalanches threatened areas.

Keywords: avalanche, digital terrain model, GIS, avalanche release zones, avalanche run-out, avalanche path, RAMMS, Sutovska valley

Obsah

Úvod	11
1. Charakteristika záujmového územia	12
1.1. Geologická stavba	13
1.2. Geomorfológia	14
1.3. Klimatická charakteristika	15
1.4. Vegetačný kryt	17
2. História lavínových javov v Malej Fatre	19
3. Lavíny a faktory ich vzniku	21
3.1. Topografické faktory	21
3.2. Meteorologické faktory	23
3.3. Zloženie snehovej pokrývky	25
4. Charakteristika a vlastnosti lavín	27
4.1. Pohyby v snehovej pokrývke	27
4.2. Klasifikácia lavín	27
5. Využitie geografických informačných systémov pri modelovaní lavínového nebezpečenstva	31
5.1. Tvorba vstupných dát	31
5.2. Software	33
6. Modelovanie lavínového nebezpečenstva	34
6.1. Štatistický rozbor lavínovej databázy	34
6.2. Identifikácia odtrhových zón	38
6.2.1. Výsledky modelovania oblastí vzniku lavín	43
6.3. Modelovanie dráh a dosahov lavín	44
6.3.1. RAMMS (Rapid Mass MovementS)	44
6.3.2. Modelovanie dynamiky lavín s využitím RAMMS	45
6.3.3. Výsledok simulácie v dynamickom modeli RAMMS	48
7. Záver	51
8. Zoznam použitej literatúry	52
9. Zoznam použitých obrázkov	55

10.	Zoznam grafov a tabuliek	56
-----	--------------------------------	----

Zoznam použitých skratiek

DEM – Digital elevation model

DMT – Digitálny model terénu

DTM – Digital terrain model

ESRI – Environmental Systems Research Institute

GIS – Geographic information system (geografický informačný systém)

HZS – Horská záchranná služba

CHF – Švajčiarsky frank

m n.m. – Nadmorská výška nad morom

NP – Národný park

RAMMS – Rapid Mass Movements

SHMÚ – Slovenský hydrometeorologický ústav

S-JTSK – Súradnicový systém jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej

SLF - Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Švajčiarsky federálny inštitút pre výskum snehu a lavín)

SLP HZS – Stredisko lavínovej prevencie horskej záchrannej služby

SLPDB – Databáza strediska lavínovej prevencie

TIN – Triangular irregular network (nepravidelná trojuholníková sieť)

WSL - Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Konfederačný výskumný ústav pre lesy, sneh a krajinu)

Úvod

Úvodom tejto bakalárskej práce je potrebné podotknúť, že lavíny sú prirodzeným vysokohorským prírodným javom, s ktorým sa ľudstvo stretáva od nepamäti. Sú neoddeliteľnou súčasťou hôr a vždy nesú so sebou riziko. V posledných desaťročiach sa stávajú čoraz populárnejšie rôzne druhy zimných športov ako lyžovanie, skialpinizmus, či v neposlednom rade aj vysokohorská turistika. Všetky tieto aktivity však nesú, okrem svojich krás a výhod, aj určité nebezpečenstvo spojené s lavínami.

Je potrebné, aby človek lavíny rešpektoval a bol dôkladne informovaný o podmienkach ich vzniku. To viedlo k skúmaniu lavín za účelom znižovania lavínového rizika, k ich predikcii a k znižovaniu negatívnych dôsledkov, ktoré lavíny so sebou prinášajú a so snahou o komplexné vyhodnotenie všetkých súvislostí, ktoré s lavínami súvisia.

V súčasnosti slúžia k skúmaniu a analýze lavín nástroje GIS, ktoré umožňujú identifikáciu potenciálnych lavínových odtrhových zón a taktiež simuláciu a predikciu pohybu lavínových dráh a dosahov.

Cieľom bakalárskej práce bude využitie nástrojov GIS pre prípravu dát vstupujúcich do modelu, identifikácia odtrhových zón na základe zhodnotenia vlastností reliéfu a následné modelovanie priebehu lavíny prostredníctvom prostriedku pre dynamické modelovanie pohybu lavín - RAMMS a vytvorenie animácie tohto pohybu.

Získané výsledky bude možné následné využiť v praxi pri lavínovej prevencii a tým budú vytvorené podklady pre zníženie lavínového rizika v danej oblasti.

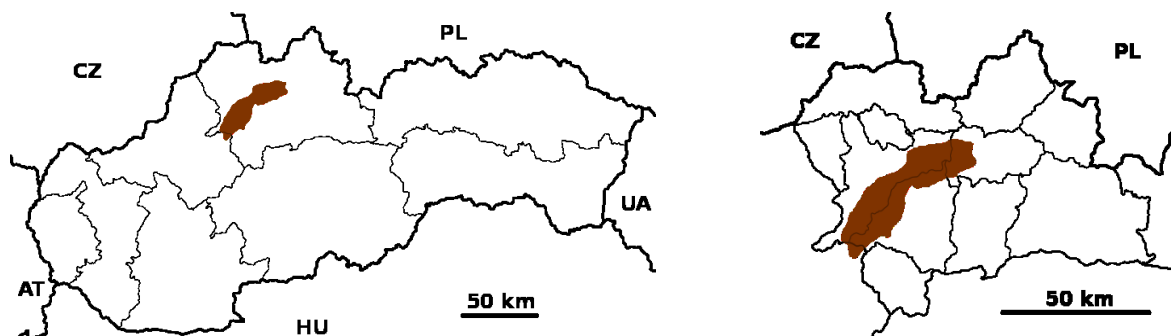
Na dosiahnutie tohto cieľa boli stanovené čiastkové ciele:

1. Oboznámenie sa s problematikou mapovania lavínového rizika.
2. Výber záujmového územia.
3. Popis charakteru reliéfu záujmového územia.
4. Oboznámenie sa so spôsobmi určovania odtrhových zón.
5. Využitie nástrojov GIS na získanie potrebných vstupných dát do modelu.
6. Identifikácia potenciálnych odtrhových zón na základe zhodnotenia vybraných vlastností reliéfu.
7. Modelovanie pohybu lavín prostredníctvom nástroja RAMMS

1. Charakteristika záujmového územia

Orografický celok Malá Fatra sa nachádza v severozápadnej časti Slovenska. Spadá do podprovincie karpatských pohorí a v rámci nich do Západných Karpát.[25] Rozloha vlastného územia je 22 630 ha, rozloha ochranného pásma je 22 262 ha. Územie Národného parku Malá Fatra je 23km dlhé a 13km široké.[28] Rieka Váh postupným zahlbovaním vytvorila prirodzenú hranicu, ktorá rozdeľuje Malú Fatru na dva podcelky – Krivánsku Malú Fatru a Lúčanskú Malú Fatru.[17] Nižšia Lúčanská Fatra leží juhozápadne a najvyšším vrchom je Veľká Lúka (1475,5 m.n.m.). Severovýchodne od spomínaného priesmyku je vyššia Krivánska Fatra. Jej najvyšším vrchom je Veľký Fatranský Kriváň (1708,7 m.n.m.).[25]

Celkový smer pohoria je SV – JZ a jeho pôdorys má tvar nepravidelnej elipsy. Vzdušná dĺžka pohoria je 52 km a najväčšia šírka 16 km.[6] Povrch pohoria je značne členitý, s mnohými hlbokými tiesňavami a bralnatými útvarmi. Tieto sú príznačné najmä pre severné úbočia. Najvýraznejšími tiesňavami sú Dolné, Nové a Horné diery, situované v oblasti Rozsutcov. Ďalej sú to rovnomenné Tiesňavy, vytvárajúce neopakovateľnú kulisu vstupnej brány do Vrátnej doliny. Podstatne menšie a takmer neznáme kaňony sa nachádzajú v záveroch viacerých menších dolín tohto pohoria. Také sú okrem iných aj v Kurskej a Belskej, ale tiež v južne ležiacej Šútovskej doline.[25]



Obr. 1: Národný park Malá Fatra v rámci celej Slovenskej republiky a Žilinského kraja, zdroj: http://sk.wikipedia.org/wiki/Malá_Fatra

Zvolené územie, dolina Šútovského potoka, sa nachádza v Krivánskej časti Malej Fatry. Dolina začína pod hrebeňom medzi vrcholmi Stoh a Poludňový Grúň a preteká ňou Šútovský potok, ktorý pramení v juhozápadných svahoch vrcholu Stoh a ústi do rieky Váh. Práve strmé a trávou porastené svahy Stohu predstavujú ideálnu sklznú plochu a vytvárajú tak dobré podmienky pre vznik lavín. Západne leží Poludňový Grúň, za ktorým ležia na južne tiahnucom sa hrebeni vrcholy Steny - severný vrchol a Steny - južný vrchol, ktorých nezalesnené a trávou porastené svahy umožňujú potenciálny vznik snehových lavín.

Rezervácia sa nachádza v katastrálnom území obce Šútovo, Párnica a Kľačany, okres Martin a Dolný Kubín. V chránenom území sa nachádza vyhlásený chránený

prírodný výtvor Šútovský vodopád a kaňon Tesné, ktorý je ojedinelým javom na kryštaliniku Malej Fatry.[16]

Za posledné 2 roky došlo na tomto území k zosuvu lavín dvakrát a žiaľbohu v oboch prípadoch došlo k stratám ľudských životov. V oboch prípadoch vznikla lavína na svahoch Poludňového Grúňa.

1.1. Geologická stavba

Malá Fatra predstavuje jedno z pohorí Západných Karpát, kde možno veľmi dobre sledovať príkrovovú stavbu, ktorá je typická pre tento úsek karpatského oblúka.[16]

Z hľadiska geologickej stavby patrí Malá Fatra k jadrovým, čiže kryštálicko-druhohorným pohoriam a skladá sa z kryštálického jadra a z obalu druhohorných sedimentárnych (usadených) hornín. Podstatnou mierou sa na jej stavbe podieľajú horniny kryštalinika, zatiaľ čo horniny druhohôr budujú sev. a juhozáp. časť a úzkym pruhom vrúbia západný okraj pohoria, kde vystupujú i horniny mladšieho paleozoika.[6]

Kryštálické jadro Malej Fatry tvoria kryštálické bridlice (najmä ruly a paraluly) a granitoidné horniny (biotitický granodiorit až kremenný diorit d'umbierskeho typu a granodiority až žuly magurského typu). Zastúpenie jednotlivých hornín kryštalinika je však nerovnomerné. Kryštálické bridlice sa vyskytujú len v južnej časti pohoria. Horniny mladšieho paleozoika sú zastúpené veľmi útržkovite. Ku karbónu patria tmavé jemnopiesčité fylity, ktoré sa vyskytujú na západnom obvode kryštálického jadra. Perm je vyvinutý v úzkom pásme na západnom svahu. Tvorí ho súvrstvie pestrých sericitických bridlíc, ktoré sa striedajú s arkózovitými pieskovecami. Pieskovce často prechádzajú do hrubozrnných arkóz až zlepcov.[6] Geologické podložie Šútovskej doliny tvorí žula, ojedinele vápenec a kremenec.[16]

Hlavné tektonické celky Malej Fatry sú uložené nad sebou v tomto poradí: a) obalová séria, b) križňanský príkrov, c) chočský príkrov.[16]

Obalová séria je najrozšírenejšia na južných svahoch hlavného hrebeňa a v uzávere Vrátnej doliny. Začína sa spodným triasom vo vývoji sivých, ružových kremenných pieskovcov, zlepcov vo vrchnej časti s preplástkami a polohami pestrých ílovitých bridlíc, patriacich vyššej časti spodného triasu. Z tektonického hľadiska obalová séria je na mieste pôvodnej sedimentácie, v priamom nadloží kryštálického jadra. Priemerný sklon je 30-50° na severe, resp. severozápade.[16]

Križňanský príkrov sa začína tmavými vápencami gutensteinského typu, ktoré zastupujú stredný trias – anis. V ich nadloží je vyvinuté mohutné súvrstvie lavicovitých dolomitov, často s polohami organodetritických typov. Veľmi dobre sú odkryté v doline Zázrivky, v Šútovskej doline a na mnohých iných miestach. Z tektonického hľadiska patrí križňanský príkrov do skupiny spodných západokarpatských príkrovov. Vystupuje v presunutej pozícii v nadloží obalovej série s generálnym úklonom súvrství na S, prípadne SZ so sklonom 30 - 40°.[16]

Chočský príkrov – horniny chočského príkrovu tvoria najkrajšie skalné útvary Malej Fatry, či sú to už Tiesňavy, hrebeň Sokolia alebo jeden z najkrajších horských

vrchov Slovenska Veľký Rozsutec. Chočský príkrov je najvyššou tektonickou štruktúrou mezozoika Malej Fatry. Jeho priebeh v teréne veľmi dobre vidieť v oblasti Chlebu a prakticky v celom úseku hlavného malofatranského hrebeňa (Veľký Kriváň – Stoh).[16]



Obr. 2: Oblé tvary vrcholu Stoh, typické pre Krížňanský príkrov, v pozadí dominantný Rozsutec s ostrým skalnatým reliéfom patriacim do Chočského príkrovu. Zdroj: autor

1.2. Geomorfológia

Pestré geologické podložie vplyvom rôznej odolnosti hornín voči zvetrávaniu, predovšetkým mezozoického obalu, podmienilo členitý reliéf s charakteristickými bralami. Na vápnitých horninách vznikli tiesňavy, rozličné skalné útvary a bralnaté hrebene. Tento reliéf ostro kontrastuje s menej členitým a zaobleným povrchom na ľahšie zvetrávajúcich horninách. Najbohatšie tvarovaný reliéf je na dolomitoch. Podzemné krasové javy sú vyvinuté na vápencoch.[27]

K pozoruhodnostiam z geomorfologického hľadiska patrí Šútovská epigenéza, Tiesňavy, Strečniansky prielom Váhu a v rámci Slovenska unikátna Kryštálová jaskyňa s výzdobou tvorenou kalcitovými drúzami, žiaľ v súčasnosti je už značne poškodená. Najznámejšou horou je Veľký Rozsutec, ktorý je aj v znaku národného parku. Najvyšším vrchom územia je Veľký Fatranský Kriváň (1709 m n. m.), najnižšie položené miesto (305 m n. m.) je rieka Váh pri Strečne na hranici ochranného pásma. Územie je pomerne bohaté na vodné pramene, vyvieračky a vodopády.[27]



Obr. 3: Striedanie členitých a zaoblených tvarov reliéfu, zdroj: autor

Podľa typu reliéfu patrí Malá Fatra svojim výškovým rozpätím 340 - 1709 m do nižšej hornatiny až veľhornatiny, alebo nízkej vysočiny až vysokej vysočiny, pričom prevahu majú stredovysočiny.

1.3. Klimatická charakteristika

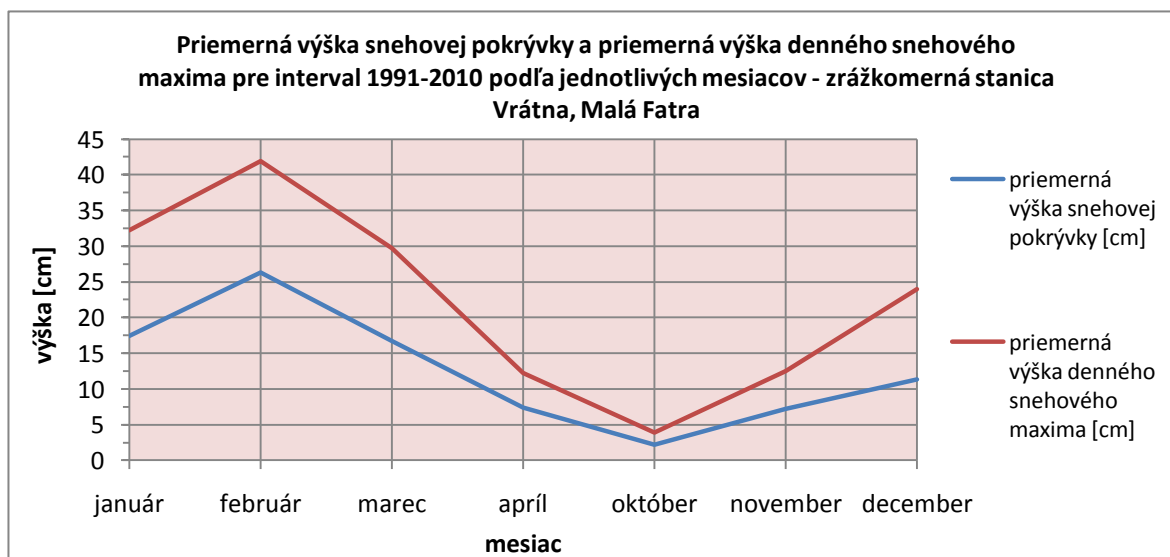
Malá Fatra má veľmi dobré klimatické podmienky, vhodné na turistiku, lyžovanie a rekreáciu. Hlavným znakom klimatických pomerov je značná premenlivosť – náhle zmeny počasia rozličného charakteru, náhle prechody z teplého do studeného obdobia a striedanie obdobia so zrážkami a bez zrážok. Táto tendencia častej výmeny typov počasia ustúpi niekedy tzv. zotrvačnému znaku v priebehu počasia, keď sa udrží dlhšie trvajúci interval teplého a suchého počasia, najmä v druhej polovici leta a začiatkom jesene, alebo naopak dlhšie obdobie s chladným a daždivým charakterom počasia.[6]

Počasia je ovplyvnené nadmorskými výškami. Celoročný priemer je +6 °C, najteplejší mesiac je júl s priemernou teplotou +15 °C, najchladnejší január -4 °C. Ročné zrážky dosahujú 1045 mm. Najnižšie teploty sú v mesiacoch január až marec a pohybujú sa v rozmedzí – 15 až – 23 °C.[28]

Vyššie časti Malej Fatry patria do chladnej klimatickej oblasti. Priemerná ročná teplota vo vyšších polohách dosahuje 2°C a v nižších, dolinách, ktoré patria do mierneho klimatického pásma, 7°C.[26] Prvý deň so snehovou pokrývkou je medzi 10. Až 20. októbrom a posledný deň so snehovou pokrývkou je medzi 1. až 10. májom.[7]

Pre zhodnotenie klimatickej charakteristiky boli použité dáta poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom (ďalej len SHMÚ) zo zrážkomernej stanice vo Vrátni, kde je systematicky zaznamenávaná aj teplota vzduchu, výška snehu či iné meteorologické charakteristiky.

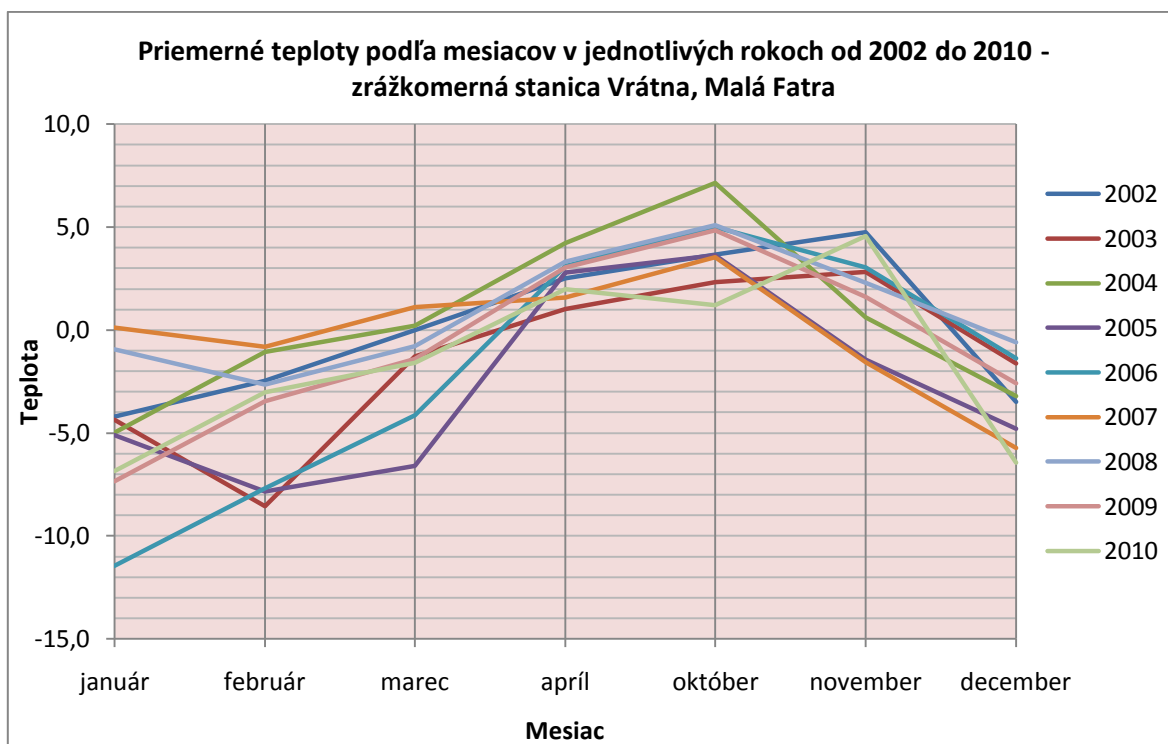
Jednými z poskytnutých dát bola priemerná výška snehovej pokrývky či priemerná výška denného snehového maxima pre posledné 2 desaťročia, teda od roku 1991 po rok 2010, a to podľa jednotlivých mesiacov s prítomnosťou snehu (január – apríl a október – december).



Graf 1: Priemerná výška snehovej pokrývky a priemerná výška denného snehového maxima podľa jednotlivých mesiacov s prítomnosťou snehovej pokrývky – dvadsaťročný priemer (1991-2010), zdroj: SHMÚ

Z grafu je zrejmé, že v priemere bolo najväčšie množstvo snehu zaznamenané vo februári a najmenej v októbri. Medzi týmito extrémami krivka približne lineárne klesá, resp. stúpa. Maximum priemernej výšky snehovej pokrývky predstavuje 26,3 cm vo februári a minimum 2,2 cm v októbri. Maximum priemernej výšky denného snehového maxima predstavuje 41,9 cm pre mesiac február a minimum 3,9 cm pre október. Táto zrážkomerná stanica sa nachádza v nadmorskej výške 920 m n.m., čo je síce značne nižšie od pozorovaného územia, resp. potenciálne rizikových svahov, ale je najbližšia k záujmovej oblasti a vypovedá o charaktere počasia v oblasti.

Ďalšie dáta boli poskytnuté Horskou záchrannou službou – Malá Fatra (HZS) so sídlom vo Vrátni a išlo o zaznamenané teploty pre každý deň od roku 2002. Z týchto dát boli vypočítané mesačné priemery (rovnako pre mesiace s prítomnosťou snehovej pokrývky) pre každý rok a následne porovnané v grafe.



Graf 2: Priemerné mesačné teploty (pre mesiace s prítomnosťou snehovej pokrývky) pre roky 2002-2010, zdroj: HZS Malá Fatra

Z uvedeného grafu vyplýva, že najchladnejším mesiacom bol vo väčšine prípadov január a najteplejším október. Najnižšia priemerná mesačná teplota bola vypočítaná pre január 2006, a to $-11,7^{\circ}\text{C}$. Počas tohto mesiaca klesla teplota až sedemkrát pod -10°C a dokonca päťkrát pod -20°C . Išlo teda o extrémne chladný mesiac. Najteplejším priemerným mesiacom bol október 2004, kedy priemerná mesačná teplota predstavovala $7,1^{\circ}\text{C}$.

1.4. Vegetačný kryt

V národnom parku Malá Fatra zaberajú lesy 70 % rozlohy. Dnešné zloženie a rozloha nezodpovedá pôvodným lesom. Pôvodná plocha lesov bola oveľa väčšia. Najvyššie položené lesné porasty dosahovali nadmorskú výšku 1450 m n. m. a nad nimi sa rozprestieralo súvislé pásmo kosodreviny. V 16. storočí, v dobe valašskej kolonizácie, sa vplyvom pastvy hospodárskych zvierat značne znížila horná hranica lesa. Negatívna činnosť človeka mala vplyv aj na zmenu drevinového zloženia. Pôvodné zmiešané lesy boli nahradené smrekovými monokultúrami.[6] Na určitých miestach boli zmiešané lesy nahradené čistými bučinami. Takto zmenené lesy majú oveľa nižšiu stabilitu oproti pôvodným zmiešaným lesom. Pôvodný zmiešaný les je na tomto území zložený z tzv. karpatskej zmesi, teda zmesi buka, smreka a jedle, s vtrúsenou prímiesou iných drevín, ako sú javor horský, smrekovec, hrab, jaseň, breza, borovica a pod. V súčasnosti prevládajú listnaté dreviny (60 %) nad ihličnatými (40 %). Najrozšírenejšou drevinou je buk (55 %), potom nasleduje smrek (30 %), jedľa (6 %), kosodrevina (3 %) a javor horský (2 %).[27]

Zvolené územie, dolina Šútovského potoka, je z väčšej časti zalesnené. Prevládajú listnaté lesy, ktoré postupne prechádzajú s rastúcou nadmorskou výškou do lesov zmiešaných až ihličnatých, kosodreviny až po trávnatý porast, ktorý sa miestami strieda s riedkou kosodrevinou. Práve takéto trávnaté svahy poskytujú veľmi dobré podmienky pre vznik lavín. Kosodrevina predstavuje stabilizujúci prvok, ale pri vyššej vrstve snehu a jej prekrytí sa môžu aj v miestach s výskytom kosodreviny vyskytovať povrchové lavíny. V poslednej dobe sme svedkami stále častejšieho výskytu lavín v preriedených, exhalátni a škodcami oslabených lesných porastoch.[12] Najrizikovejší typ pokryvu predstavuje dlhá uľahnutá tráva, ktorá tvorí ideálnu sklznú plochu. Počas valašskej kolonizácie boli rozsiahle trávnaté plochy do veľkej miery spásané dobytkom, čím sa znižovalo riziko vzniku lavínových javov, pretože krátka spásaná tráva nepredstavuje nebezpečenstvo do takej miery ako dlhá uľahnutá tráva.

Malé skupiny stromov nad hornou hranicou lesa pôsobia ako opora snehovej pokrývky. Najlepšou ochranou pred lavínami je hustý, zapojený ihličnatý les s dobre vyvinutým podrastom.[24]

Pre analýzu krajinej štruktúry bola zhodnotená ortofoto zo zvolenej oblasti a v prostredí ArcGIS 9.3 bola na základe tohto ortofota vytvorená vektorová vrstva typu pokryvu. Spolu bolo vytvorených 12 kategórií typu pokryvu, ktoré poslúžia pri určovaní rizika z hľadiska vzniku lavín a priradení jednoznačných váh vstupujúcich do výpočtu. Vytvorená mapa krajinej štruktúry je súčasťou mapovej prílohy.



Obr. 4: Svahy porastené dlhou uľahnutou trávou v severnej časti doliny. Takéto svahy v kombinácii s veľkým sklonom sú najrizikovejšie pre vznik lavínových udalostí. Zdroj: autor

2. História lavínových javov v Malej Fatre

V našich horstvách je výskyt lavín pomerne častý a ich následok v mnohých prípadoch aj žiaľbohu tragický. V posledných rokoch má na zvýšený počet lavín vplyv najmä rozmach zimných športov (lyžovania, snowboardingu či skialpinizmu) a taktiež zimnej turistiky v spojení s neznalosťou pravidiel pohybu v teréne a nedostatkom poznatkov o riziku ich vzniku.

V pohorí Malá Fatra sa doposiaľ vyskytol pomerne malý počet lavínových prípadov s ľudskými obeťami. Je ich spolu 10. Najväčšia tragédia v pohorí s dvoma obeťami sa odohrala cez Vianoce v roku 1982 na svahu Suchého. V tom čase to bola v pohorí ojedinelá lavína.[14] Uvedené lavínové nešťastie sa vyskytlo v období, keď snehová pokrývka mala všeobecne malú, podpriemernú hrúbku.[15] Zvýšený počet lavínových udalostí bol zaznamenaný v 90. rokoch 20. storočia a taktiež v posledných rokoch. V Malej Fatre bol priaznivý pomer medzi osobami v kontakte s lavínami a ich obeťami.[14]

Tab. 1: Lavínové prípady s účasťou osôb v Malej Fatre. Upravené podľa [14] a doplnené z ročeniek SLP

Rok	Počet prípadov	Postihnuté osoby - počet				Činnosť					
		celkom ohrození	Zranenie			turisti	lyžiari	skialpinisti	snowboardisti	horolezci	ostatní
			nezranení	zranení	mŕtvi						
19.stor.	1	1			1						1
1968	1	2	1	1			2				
1970	1	2		1	1					2	
1982	2	17	10	5	2	17					
1987	1	1	1				1				
1993	1	1			1		1				
1994	1	1	1					1			
1996	2	2	1		1			1		1	
1998	1	1	1				1				
1999	1	1	1					1			
2000	1	1	1						1		
2001	2	5	4		1			3	2		
2004	1	1			1			1			
2007	1	1		1		1					
2008	1	2	1		1			2			
2010	1	2		1	1				2		
Spolu	19	41	22	9	10	18	5	9	5	3	1

Za celú históriu evidencie lavínových prípadov bolo v Malej Fatre ohrozených celkovo 41 ľudí, z ktorých približne polovica vyviazla bez zranení a štvrtina prišla o život. Najviac ohrozenou skupinou boli turisti, po nich nasledujú skialpinisti, lyžiari, snowboardisti, horolezci a ďalšie skupiny.

Lavína s najväčšou účasťou osôb sa odohrala v roku 1982, kedy bolo ohrozených až 17 ľudí, z ktorých 2 zahynuli.

Na svahoch Šútovskej doliny síce v histórii našťastie nedošlo k zosuvu lavíny s tragickými následkami, no početnosť výskytu lavín v rámci Malej Fatry je pomerne vysoká, najmä na svahoch Stien, Stohu, Prednej a Zadnej Úboči a Hromového.

Práve na severnej strane Stien (spadajúcich do Vrátnej doliny) došlo 31. decembra roku 2008 k lavínovému nešťastiu, pri ktorom zahynul jeden z dvojice skialpinistov. Jednalo sa o povrchovú lavínu s približnou dĺžkou dráhy 800 m s výškou odtrhu 10 až 25 cm, výškou nánosov 1,5 až 2,5 m a šírkou nánosov 1,5 až 4 m.[24] V deň pádu lavíny bolo v Malej Fatre vyhlásené mierne lavínové nebezpečenstvo, teda 2. stupeň z 5-dielnej medzinárodnej stupnice lavínového nebezpečenstva. Podľa lavínových odborníkov a zaznamenaných štatistík dochádza pri tomto stupni k najväčšiemu počtu tragédií, pretože skialpinisti, turisti či lyžiari toto nebezpečenstvo často podceňujú. (podľa Lizucha v [11])

Severné svahy Stien, na ktorých došlo k tragédií, majú podobné sklonitostné pomery a typ vegetačného pokryvu ako južné svahy spadajúce do Šútovskej doliny, preto je možné očakávať rovnaké riziko v sledovanej oblasti, hlavne na rozsiahlych, trávou porastených plochách.



Obr. 5: Základové lavíny na trávnatých svahoch Stien, v pozadí vrchol Stoh.
Zdroj: http://www.mountain.sk/uploads/media/358/100_2141.jpg

3. Lavíny a faktory ich vzniku

Lavína, ako lokálny dynamický jav v horskom prostredí, je veľmi ťažko predvídateľná a predstavuje nebezpečenstvo, ohrozujúce sídla, infraštruktúru a v neposlednom rade aj človeka. Lavínová situácia je závislá od viacerých faktorov.

Podľa Biskupiča [2] sa faktory, ktoré sú podstatné pre vznik lavín, delia na dynamické – meteorologické vplyvy a vlastnosti snehovej pokrývky a statické, ktoré predstavujú terén a jeho topografické prvky ako napr. nadmorská výška, expozícia, sklon, vertikálne a horizontálne zakrivenie.

Podľa Lizucha [12] môžeme faktory lavínového nebezpečenstva rozdeliť do 3 skupín:

TOPOGRAFICKÉ FAKTORY:

- orientácia svahu
- sklon svahu
- tvar terénu
- povrch terénu

METEOROLOGICKÉ FAKTORY:

- vietor
- teplota vzduchu
- dážď
- slnečné žiarenie

ZLOŽENIE SNEHOVEJ POKRÝVKY:

- nový sneh
- celková výška snehovej pokrývky
- vlhkosť snehu
- veľkosť snehových kryštálov

Pri vzniku snehových lavín pôsobia všetky faktory komplexne a sú odlišné pre každú skúmanú oblasť. Z toho dôvodu je nutné, aby bol model upravený podľa podmienok v danej oblasti a historických záznamov lavínových udalostí. Ďalším dôležitým faktorom podieľajúcim sa na vznik lavín je človek, ktorý svojou činnosťou predstavuje iniciátora spustenia lavíny. Tieto rôzne antropologické faktory však nie je možné do modelu zahrnúť. Aj z toho dôvodu nejde komplexne zaistiť prevenciu voči lavínam a úplne zamedziť riziko ich vzniku.

3.1. Topografické faktory

Orientácia svahu (expozícia) predstavuje polohu svahu voči slnečnému žiareniu a taktiež voči smeru prevládajúceho vetru, ktorý sa rovnako podieľa na riziku vzniku lavín. V dôsledku rôznej orientácie svahov dopadá na ne rozdielne množstvo slnečnej energie. Podľa alpskej štatistiky sa až 65 % všetkých lavínových nešťastí stalo na svahoch orientovaných na sever a východ.[12] Na zatienených severných svahoch hrozí potenciálny

vznik doskových lavín, pričom na svahoch, kde dopadá slnečné žiarenie, hrozí riziko mokrých tečúcich lavín. Na zatienených svahoch dochádza k tvorbe dutinovej inovate, ktorá po prekrytí vrstvami snehu pôsobí veľmi nestabilizujúco.

Orientácia voči vplyvu vetra je dôležitá z hľadiska transportu snehu.[22] Ten spôsobuje na záveterných svahoch akumuláciu snehu a na náveterných svahoch sneh odvieva (viď meteorologické faktory). U nás prevláda predovšetkým severozápadný vietor a aj z toho dôvodu je najviac lavín na juhovýchodných svahoch na rozdiel od Álp.

Sklon svahu je prvoradá podmienka pre vznik lavínových udalostí, ktorý umožňuje lavínam ich spustenie a pohyb.[13] Je to dôležitý faktor pri odhade lavínového nebezpečenstva. So sklonitosťou sa mení veľkosť, poloha a štruktúra napätí v snehovej pokrývke. Vplýva na procesy sadania snehovej pokrývky, metamorfózu snehu, vývoj vnútorného trenia medzi snehovou pokrývkou a podkladom, prípadne medzi vrstvami snehovej pokrývky.[2] Zmena sklonitosti vplýva na ukladanie snehu a rozdielnú stabilitu snehovej pokrývky. Sklonitosť terénu hrá najväčšiu rolu najmä v miestach odtrhových zón lavín.

Lavínové svahy v našich podmienkach majú sklon odtrhového územia najčastejšie 28° až 45°, najkritickejšia z toho je oblasť 35° až 45°. Sklony nad 50° nedovoľujú akumuláciu, sneh sa zosúva v priebehu sneženia pod tieto strmé steny. Na Slovensku neboli zaregistrované lavíny s menším sklonom odtrhu ako 20°.[12]. Tieto intervaly sklonov sa však líšia a hodnoty kritického intervalu sú podľa rôznych autorov rozdielne.

Existuje kategorizácia svahov podľa početnosti a výskytu lavín:

Tab. 2: Kategorizácia svahov podľa výskytu lavín (upravené podľa [14])

Sklon	Charakteristika
menší ako 20°	svahy s ojedinelým výskytom lavín
20° - 35°	svahy s častým výskytom lavín
väčší ako 35°	svahy s veľmi častým výskytom lavín

Tvar terénu je ďalším faktorom ovplyvňujúcim vznik lavín. Rozdeľuje sa na 2 komponenty – horizontálne zakrivenie, teda miera zmeny v smere vrstevnice a vertikálne zakrivenie, čo je miera zmeny v smere spádnice, ale je potrebné ho hodnotiť komplexne.

Zakrivenie v smere vrstevníc predstavuje predovšetkým žľaby, ktoré sú konkávneho tvaru a chrby, ktoré predstavujú konvexné tvary. Pre lavíny sú rizikovejšie žľaby, v ktorých dochádza k akumulácii snehu. Spádnicová krivosť oveľa výraznejšie vplýva na vznik a priebeh lavín. Ak je konvexného tvaru, dochádza k zväčšovaniu gravitačnej sily a taktiež sa zväčšuje sklon, čím sa zväčšuje napätie v snehovej pokrývke. Pri konkávnom tvare sa sklon znižuje a pôsobenie gravitačnej sily je malé, čo sa prejavuje stabilizáciou snehu a minimálnym rizikom vzniku snehových lavín.

Žľaby, muldy a kotly sú najčastejšie miesta lavínových dráh. Aj veľké, rovnomerné, súvislé svahy so sklonom nad 30° sú nebezpečné. Terénne nerovnosti ako hrebene, rázsochy a terasy pôsobia stabilizujúco na snehovú pokrývku.[12]

V našich podmienkach rozoznávame 2 hlavné typy lavínového terénu – hôľny a bralnatý. Hôľny reliéf je charakteristický menším sklonom terénu, typickými lavínovými kotlami s veľkou zbernou plochou, umožňujúcou veľkú akumuláciu snehu s trávnatým terénnym podkladom. Lavíny tu nepadajú často, ale dosahujú veľké rozmery. Lavíny ničia les najmä v oblasti jeho hornej hranice.[12]

Bralnatý reliéf má veľký sklon, veľa strmých a úzkych lavínových žľabov so skalnatým podkladom, ktoré však nedovoľujú veľkú akumuláciu snehu. Padajú tu menšie lavíny, ale často.[12] S oboma typmi lavínového terénu je možné sa stretnúť v Malej Fatre, kde je zastúpený predovšetkým hôľny reliéf. Bralný reliéf je zastúpený na Rozsutci, patriacim do Chočského príkrovu.

Povrch terénu predstavuje veľmi dôležitý faktor lavínovej hrozby, ktorý je potrebné dôkladne poznať. Hladký, trávnatý povrch, prípadne povrch s veľmi riedkym porastom poskytuje ideálne podmienky výskytu lavín. Nižšie porasty, ako napr. kosodrevina alebo kroviny, môžu pôsobiť stabilizujúco, ale pri vyššej snehovej pokrývke môžu byť z väčšej časti alebo úplne zakryté snehom a zvyšovať tak pravdepodobnosť výskytu povrchových lavín. Najlepšou ochranou pred lavínami je hustý ihličnatý les s dobre vyvinutým podrastom. Listnatý les, alebo preriedený ihličnatý les, v ktorom chýba podrast a kmene stromov sú tak ďaleko od seba, že sa v ňom dá pohodlne lyžovať, sa nemôže považovať za bezpečný a musíme o ňom uvažovať ako o potenciálne lavínovom svahu a rátať s možnosťou odtrhnutia lavíny.[12]

Povrch terénu je teda určujúcim parametrom vypovedajúcim o drsnosti reliéfu a na základe ktorého je možné odvodiť frikčné koeficienty.

Nadmorská výška ako ďalší z faktorov lavínovej hrozby spôsobuje zmenu mnohých meteorologických prvkov. S rastúcou nadmorskou výškou sa zvyšuje najmä intenzita snehových zrážok a pôsobenie vetra. Vegetácia s rastúcou nadmorskou výškou prechádza z lesného porastu, do kosodreviny, trávnatých plôch až po skalnatý povrch a tým sa znižuje stabilizácia snehu. Dochádza tiež k nerovnomernému rozloženiu snehovej pokrývky. Všeobecne platí, že so vzrastajúcou nadmorskou výškou rastie lavínové nebezpečenstvo, v určitých prípadoch je možné stretnúť sa aj s výnimkami (inverzné počasie a pod.)

Mapy jednotlivých faktorov zvolenej oblasti – doliny Šútovského potoka sú súčasťou mapovej prílohy.

3.2. Meteorologické faktory

Vietor sa významne podieľa na formovaní snehovej pokrývky a to najmä počas snehových zrážok alebo po ich skončení. Spôsobuje prenos snehu z náveterných svahov do záveterných, kde prebieha jeho akumulácia. Tým dochádza k nerovnomernému ukladaniu snehu a tým aj väčšiemu napätiu v miestach s najväčšou vrstvou snehu. Napätie je teda

v dôsledku vzniku snehových vankúšov, prevejov, klínom a vyfúkaným doskám nerovnomerne rozmiestnené. Dôsledkom pôsobenia vetra sa zvyšuje riziko výskytu doskových lavín na záveterných svahoch.

Prenos snehu začína už pri rýchlosti vetra 5 m/s (18 km/h).[12] Množstvo vetrom preneseného snehu závisí od rýchlosti a trvania prevládajúceho vetra ako aj od lokálneho počasia, teda výskytu či absencie snehových zrážok.

Teplota vzduchu je meteorologickým faktorom, ktorý spôsobuje formovanie snehu v atmosfére už počas sneženia a podmieňuje vytváranie rôznych typov snehových kryštálov, ktoré majú odlišné vlastnosti a na vzniku lavín sa podieľajú rôzne.

Pôsobenie teploty tiež ovplyvňuje premenu už navrstveného snehu na rôzne formy snehových zrn, ktoré v kombinácii s inými vrstvami rôznych druhov zrn pôsobia buď stabilizujúco, alebo predstavujú ideálnu vrstvu pre odtrh lavín. Teplota vzduchu taktiež rozhoduje o veľkosti teplotného gradientu. Pri prekrytí nezamrznutej pôdy malou vrstvou snehu a pôsobení nízkych teplôt vzniká veľký teplotný gradient, ktorý spôsobuje veľký pohyb vodných pár v snehovej pokrývke a pri povrchu pôdy tvorbu dutinovej inovate a pohyblivého snehu. Zrná pohyblivého snehu a dutinovej inovate nemajú medzi sebou prakticky žiadnu súdržnosť a vrstvy tvorené týmito zrnami predstavujú ideálnu sklznú plochu pre nadložné vrstvy (možnosť vzniku lavíny).[12]

Nárast teploty k bodu topenia sa prejavuje značným znížením pevnosti vrstiev snehu a následné sadanie snehu, ktoré vedie k stabilizácii. Stabilizácia snehovej pokrývky prebieha najlepšie pri teplotách okolo -3° až -5° .[12] Prenikajúca voda narušuje väzby medzi snehovými zrnami, ale následne zamŕza, tým sa vytvárajú tzv. mostíky a snehová pokrývka sa výrazne stabilizuje.

Dážď sa významne podieľa na vzniku lavín, najmä v jarných mesiacoch. Spôsobuje premočenie snehovej pokrývky a výrazné zníženie stability snehu, čo vedie k vytváraniu lavín z mokrého snehu alebo základových lavín. Zvýšený obsah vody zvyšuje klzkosť podkladu a taktiež sa so zvyšovaním váhy snehu zvyšuje napätie vo vrstvách snehu.

Slnečné žiarenie predovšetkým spôsobuje zvyšovanie teploty vzduchu a tým nárast teploty snehu, v dôsledku čoho sa znižuje pevnosť, následne dochádza k sadaniu snehu a jeho stabilizácii. Práve v dôsledku slnečného žiarenia je na južných svahoch pozorovaný nižší počet lavínových udalostí ako na svahoch severných či východných. Tendencia tvorby dutinovej inovate a pohyblivého snehu je najmä z tohto dôvodu na južne orientovaných svahoch malá. U nás je však pozorovaný väčší výskyt lavín na južných a východných svahoch a to predovšetkým v dôsledku činnosti vetra.

Všetky spomínané meteorologické faktory sa významne podieľajú na vzniku lavín a zvyšujú riziko ich výskytu vo vysokohorskom teréne. Tieto faktory podmieňujú množstvo a vlastnosti snehovej pokrývky, avšak pre ich značnú dynamickosť je veľmi

obťažne ich zahrnúť do modelu. Z toho dôvodu nebude ich vplyv pre zvolenú oblasť v tejto bakalárskej práci podrobnejšie rozoberaný a zahrnutý.

3.3. Zloženie snehovej pokrývky

Nový sneh, jeho kvalita a množstvo významne ovplyvňujú lavínové riziko. To sa zvyšuje s intenzitou snehových zrážok a výškou nového snehu za určitý časový interval. Nový sneh predstavuje nebezpečenstvo predovšetkým z dôvodu, že kryštály snehu sú slabo premenené a nedošlo k ich spevneniu. Takáto vrstva predstavuje veľmi nestabilný povrch. Rizikové množstvo nového snehu závisí od prevládajúcich meteorologických podmienok a znižuje sa so zhoršovaním týchto podmienok.

Podľa [12] sa za kritické množstvo nového snehu pri vhodných podmienkach považuje vrstva od 30-50 cm snehu, pričom za nevhodných podmienok je to vrstva iba 10-20 cm snehu. Vhodné podmienky prevládajú za prítomnosti slabého vetra, teploty málo pod nulou, dažďa prechádzajúceho do sneženia a na často lyžovanom svahu. (upravené podľa [12]) Za nevhodné podmienky sa považujú: silný vietor s rýchlosťou 13 m/s = 50 km/h, nižšie teploty ako -8°C, prítomnosť ľadovej kôry alebo povrchovej inovate na povrchu snehovej pokrývky a nelyžovaný resp. málo lyžovaný svah.(upravené podľa [12])

Celková výška snehovej pokrývky je taktiež dôležitým faktorom, ktorý značne ovplyvňuje lavínové nebezpečenstvo, ale výraznejšie naň vplýva zloženie snehovej pokrývky, teda druhy snehových kryštálov, ktoré majú odlišné vlastnosti. Významná je najmä jej kompaktnosť a metamorfóza snehových zŕn, ktorá sa prejavuje pri stratifikácii snehovej pokrývky.[22] Zvlášť nebezpečné sú vrstvy so slabou vzájomnou súdržnosťou snehových kryštálov (kohézia) a s nízkou príľnavosťou s inými vrstvami snehu (adhézia).

Vlhkosť snehu je faktorom, ktorý významne súvisí so stabilitou snehovej pokrývky a býva ovplyvnený aktuálnym počasím, teda výskytom dažďových zrážok a teplotou vzduchu. Zvyšujúce sa množstvo vody v kvapalnom skupenstve narušuje väzby medzi časticami snehu a tým sa oslabuje celková stabilita snehových vrstiev.

Existuje klasifikácia vlhkosti snehu. Tá je určená nasledovne:

Tab. 3: Klasifikácia vlhkosti snehu (upravené podľa [24])

Vlhkosť snehu	Charakteristika
suchý	guľa sa robí ťažko, teplota najčastejšie pod 0°C
mierne vlhký	guľa sa robí dobre, voda nie je znateľná
vlhký	voda sa nedá vytlačiť ale je znateľná
mokrý	voda sa dá vytlačiť a je dobre znateľná
veľmi mokrý	sneh je presiaknutý vodou

Veľkosť snehových kryštálov sa neustále mení od vzniku snehu, až po jeho roztopenie a tým sa ovplyvňuje celková stabilita snehových vrstiev. Všeobecne platí, že so zväčšovaním veľkosti snehových kryštálov, narastá aj riziko vzniku lavín.

Rozlišujú sa 3 druhy premien snehu:

1. **Deštruktívna premena** – nastáva už za prítomnosti snehových zrážok v atmosfére, kedy snehové kryštály vplyvom prítomnosti vodných pár v narastajú a ich vzájomným narážaním sú naopak pozmenené a deformované. So zvyšovaním vlhkosti a približovaním sa teploty k bodu mrazu vznikajú zložitejšie a mohutnejšie snehové kryštály. Po dopade na povrch dochádza opäť k premene vplyvom tlaku nadložených snehových vrstiev a ich premena na plstnatý sneh a zaokrúhlené snehové zrná a premena prebieha neustále aj pri konštantnej teplote. Vrstvy, tvorené okrúhlozrnným snehom majú väčšinou dostatočnú pevnosť a sú stabilizujúcim prvkom snehovej pokrývky.[24]
2. **Konštruktívna premena** – dochádza k nej v prípade veľkého teplotného gradientu, teda teplotného spádu, ktorý závisí okrem rozdielu teploty povrchu snehovej pokrývky a povrchu pôdy, ktorá je zvyčajne blízka 0°C, tiež výšky snehu. V dôsledku veľkého teplotného gradientu dochádza k veľmi rýchlemu narastaniu snehových zrn. Vzniká tzv. hranatozrnný pohyblivý sneh, ktorý predstavuje veľké riziko pre vznik lavín a tvorí veľmi nestabilnú vrstvu a nesúdržnú vrstvu. Podobné vlastnosti ako pohyblivý sneh, má dutinová inová, ktorá má dlhé a hranaté zrná a vzniká pri dlhodobých nízkych teplotách a pri veľkom teplotnom spáde. Podmienky na konštruktívnu premenu začínajú pri spáde 0,25°C/cm a so zvyšujúcim sa spádom konštruktívna premena prebieha intenzívnejšie.[24]
3. **Premena topením** – tento proces sa označuje tiež ako firnovatenie. Pri tomto procese dochádza k opakovanému uvoľňovaniu vodnej pary v snehovej pokrývky a následne k zamŕzaniu. Vzniká tzv. firn s pomerne veľkými zrnami, medzi ktorými sa vyskytujú pevné väzby, čím sa výrazne spevňuje snehová pokrývka a dochádza k jej stabilizácii. Firnovatenie sa často prejavuje počas jesene, alebo začiatkom jari, keď teplota cez noc klesá pod nulu a cez deň sa výrazne zvyšuje do kladných hodnôt. Cez deň sa pôsobením slnečných lúčov a vyššej teploty vytvára v snehovej pokrývke veľké množstvo vody a tým sa výrazne narušia väzby v snehových vrstvách a vzniká potenciálne nebezpečenstvo vzniku základových lavín. V priebehu večera a noci v dôsledku poklesu teploty dochádza opäť k namŕzaniu vody a vzniku silných a súdržných väzieb medzi zrnami snehu. Takto sa celý proces opakuje až do úplného roztopenia snehu.[22]

4. Charakteristika a vlastnosti lavín

Snehové lavíny a ich vlastnosti závisia od všetkých faktorov a činiteľov, ktoré sa výraznou mierou podieľajú na ich vzniku a spôsobujú zmenu polohy snehovej pokrývky a jej značnú dynamiku.

4.1. Pohyby v snehovej pokrývke

Druhy pohybu snehovej pokrývky primárne určujú sklonitostné pomery reliéfu a ovplyvňujú tým do značnej miery rýchlosť tohto pohybu. Klimatické vplyvy majú za následok premenu snehu, čo významne vplýva na pohyb snehových vrstiev.

Pohyby sa charakterizujú hlavne na základe rýchlosti a spôsobu premiestnenia snehovej hmoty, pričom sa rozlišujú javy ako [14]:

1. **Zosadanie** – proces znižovania výšky snehovej pokrývky vplyvom gravitácie a teploty. Pri vyšších teplotách sa zosadanie prejavuje vo väčšej miere.
2. **Plazenie a kĺzanie** – kombinácia pohybu v smere svahu a sadania snehu. Ide o veľmi pomalý proces (často niekoľko mm denne), ktorý nepredstavuje riziko, môže však zapríčiniť eróziu pôdy. Ovplyvňuje ho drsnosť terénu.
3. **Splaz** – zosunutie vrstvy snehovej pokrývky, ktoré prebehne malou rýchlosťou a bez väčších škodlivých účinkov.[15] Je to jav podobný lavíne, vznikajúci s menším rozsahom, ktorý sa v horskom prostredí vyskytuje pomerne často.
4. **Zosyp** – predstavuje spontánne či umelo spôsobené zosypanie snehu, najčastejšie zo skalných stien, resp. výrazne strmého terénu, kde už nedochádza počas sneženia k ukladaniu súvislej snehovej pokrývky. Tento druh pohybu snehu nepredstavuje veľké nebezpečenstvo.
5. **Lavína** – náhly pohyb snehu z odtrhového cez transportné až po akumulačné pásma, kde rozsah a dosah odtrhu premiestnenia je väčší ako 50 m.[14] Zo všetkých druhov pohybu predstavuje najväčšie riziko ohrozujúce ľudí pohybujúcich sa vo vysokohorskom teréne a spôsobujúce značné materiálne škody.

4.2. Klasifikácia lavín

Klasifikácia lavín je výsledkom dlhoročných pozorovaní a záznamov lavínových javov v horstvách mnohých krajín. Milan v [14] uvádza stále neuzavretú klasifikáciu, ktorá je klasifikáciou lavín Medzinárodnej komisie snehu a ľadu z roku 1973:

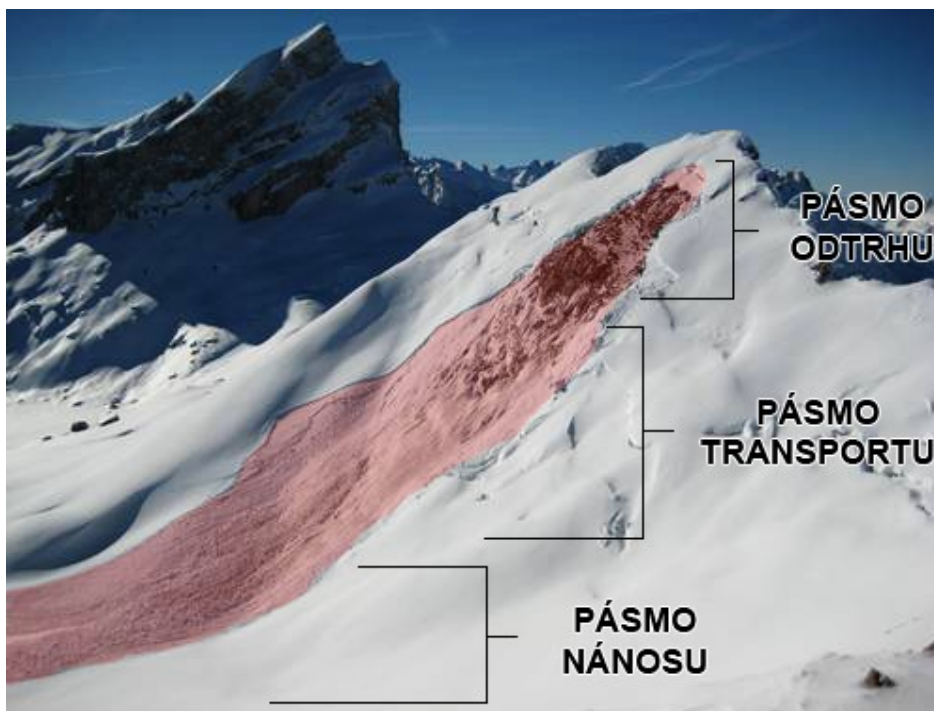
1. **Genetická klasifikácia lavín** – zahŕňa 2 hľadiská:
 - a) Fixné podmienky
 - morfológické vlastnosti terénu (nadmorská výška, sklon, expozícia, drsnosť povrchu)

b) Premennivé podmienky

- počasie posledných dní (snehové zrážky, dážď, vietor, teplota)
- kvalita snehu (mechanické a fyzikálne vlastnosti)
- charakter impulzu narušenia pevnosti (prirodzený, umelý)

2. Morfológická klasifikácia lavín

Na základe tejto klasifikácie sa lavíny delia na 3 pásma: pásmo odtrhu, pásmo transportu a pásmo nánosu.

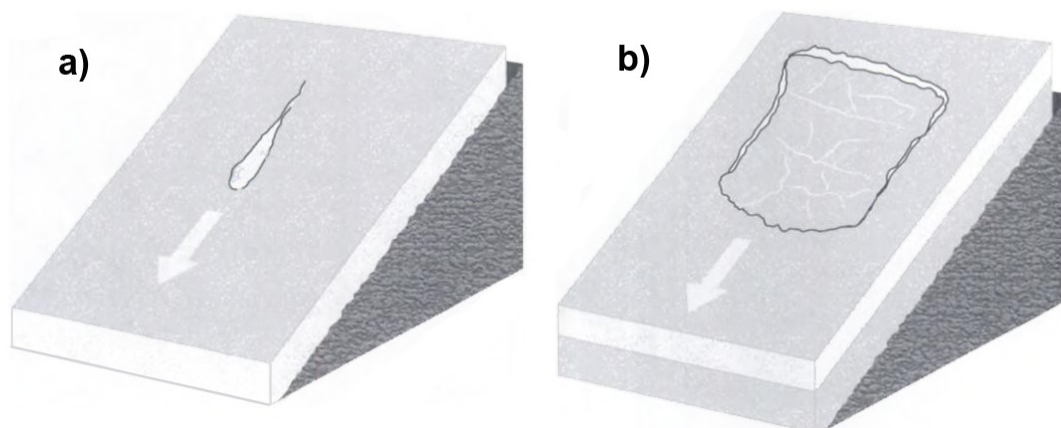


Obr. 6: Rozdelenie lavíny podľa pásiem (pásmo odtrhu, pásmo transportu a pásmo nánosu), zdroj: www.slf.ch, upravil: autor

V pásme odtrhu dochádza k narušeniu snehovej pokrývky a jej pretrhnutiu, pričom sa rozlišuje bodový a čiarový odtrh. Pri prvom spomínanom nedochádza v pásme odtrhu k akumulácii a prenosu veľkého množstva snehu. K rozpojeniu snehovej pokrývky dochádza v jednom bode, od ktorého sa lavína v smere spádnice postupne rozširuje. Ide o lavíny z voľného snehu, ktoré vznikajú na veľmi strmých svahoch z nestabilného snehu.

Pri čiarovom odtrhu dochádza k narušeniu snehových vrstiev trhlinou, ktorá je kolmá na smer spádnice svahu a s ňou postupne vznikajú po oboch stranách približne kolmo na ňu ďalšie trhliny. Predpokladom vzniku čiarového odtrhu je určitá pevnosť snehu, ktorá umožní veľkoplošné prenosy napätí každého druhu. [14]. Ak je vzniknutým napätím prekonaný odpor trenia na povrchu svahu, vzniká tzv. dosková lavína, ktorá sa pohybuje na nestabilných vrstvách snehu, napr. dutinovej inovati a pri pohybe dochádza k jej lámaniu na bloky. Na základe tvrdosti snehovej pokrývky sa doskové lavíny delia na mäkké a tvrdé.

Čiarový odtrh je typický pre tzv. základové lavíny, pri ktorých sa snehová pokrývka, tvorená väčšinou mokrým snehom, kľže po povrchu trávou porasteného svahu či po hladkom skalnatom povrchu. Odtrh však nemusí siahať až po povrch terénu. Kĺznu plochu v tomto prípade poskytuje snehová vrstva tvorená pevnejším snehom, po ktorej sa môže pohybovať aj viacero nestabilných vrstiev. Ide o povrchové lavíny, pri ktorých je predpokladom vzniku najmä tvorba snehovej pokrývky zloženej z vrstiev snehu rôznych vlastností.



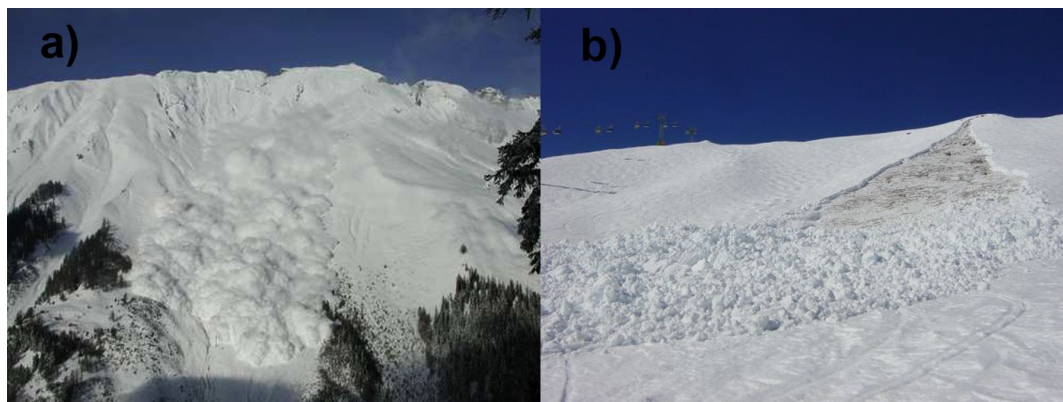
Obr. 7: Klasifikácia lavín podľa typu odtrhu: a) bodový odtrh, b) čiarový odtrh, zdroj: *The Avalanche handbook* [13], upravil: autor

Lavíny je ďalej možné klasifikovať na základe vlastností snehu, konkrétne zastúpenia vody v snehovej pokrývke, a to na lavíny z mokrého a suchého snehu. Milan v [14] ešte klasifikuje lavíny podľa toho, či sú tvorené novým snehom, ktorý predstavuje väčšie riziko, alebo snehom starým.

Pásmo transportu je úsek lavíny od zlomu odtrhu až po miesto spomalenia a zastavenia pohybu [14]. Oddeľuje pásmo odtrhu od pásma nánosu, v ktorom sa formuje lavínová dráha. V závislosti na zakrivení povrchu lavínová dráha vytvára žľabové alebo plošné lavíny. Žľabové lavíny sú charakteristické pre výrazne konkávne povrchy v smere vrstevníc z oboch strán. Pohybujú sa v pomerne úzkych žľaboch, ktoré určujú smer a pohyb snehu. Pri kumulácii snehu v priebehu zosuvu dochádza k rýchlemu narastaniu jeho výšky. Plošné lavíny vznikajú na väčšej ploche ako žľabové lavíny a v priebehu ich zosuvu sa ich šírka výrazne nemení. Počas pádu lavín sa tieto príslušné druhy môžu kombinovať v závislosti od priebehu terénu.

Lavíny je možné podľa formy pohybu snehu rozčleniť na 2 kategórie – tečúce a prachové. Rozhodujúcimi faktormi pre túto klasifikáciu sú predovšetkým tvar reliéfu, ktorý rozhoduje o rýchlosti pohybu snehu a okrem toho aj kvalita snehovej pokrývky, hlavne jej vlhkosť. Pre tečúce lavíny je charakteristické zastúpenie výrazne mokrého snehu, ktorý sa kľže menšou rýchlosťou po teréne s nízkymi hodnotami sklonu. Podľa odhadu je rýchlosť tohto pohybu od okom

rozzoznatel'ného posunu snehových más až do 15 km/hod.[15] Prachové lavíny sa vyznačujú prítomnosťou suchého snehu, ktorý sa pri lavínovom zosuve valí vysokou rýchlosťou po veľmi prudkom svahu, pričom dochádza k vírivému pohybu prachového snehu s ničivými následkami. Dosahujú rýchlosť 20 – 70 m/s a nárazový tlak 5 – 10 t/m² a sú sprevádzané tlakovou vlnou, ktorá môže mať ničivé účinky aj vysoko v protisvahu dráhy lavíny.[14]



Obr. 8: Klasifikácia lavín podľa formy pohybu: a) prachové lavíny, b) tečúce lavíny, zdroj: www.slf.ch, upravil: autor

V pásme nánosu dochádza k postupnému spomaleniu pohybu lavín až po ich postupné zastavenie. Počas tohto procesu prebieha akumulácia prenesených snehových más a jej ich opätovné ucel'ovanie. Často sa stáva, že nanesený sneh obsahuje aj prvky, ktoré sa do lavín vmiešavajú v priebehu zosuvu. Sú to najčastejšie skalné úlomky, kosodrevina, časti vegetácie, pôda ale taktiež časti obydľí či iných budov, u ktorých došlo k devastácií či úplnému zničeniu v dôsledku ničivých účinkov lavín. V závislosti od množstva týchto prvkov v pásme nánosu je možné zhodnotiť rozmery a škody lavínových udalostí.

5. Využitie geografických informačných systémov pri modelovaní lavínového nebezpečenstva

Štúdium lavín a posúdenie ich rizika je pomerne náročný proces, zvlášť v oblastiach bez historických záznamov o lavínových udalostiach.

Základom pre štúdium lavínovej problematiky v prostredí GIS je digitálny model reliéfu – konkrétne digitálny výškový model (angl. DEM), ktorý pri dostatočnej presnosti posluží pre odvodenie topografických charakteristík, ktoré významne ovplyvňujú vznik a priebeh lavínových javov v horskom teréne.

Pojem DEM je často používaný ako DTM (Digital Terrain Model), resp. slovenský ekvivalent DMT. V literatúre mnohých autorov sú tieto termíny používané ako synonymá, príp. je DEM definovaný ako podmnožina DTM.

DEM je reprezentovaný ako raster, v ktorom je každej bunke priradená hodnota nadmorskej výšky v danom mieste. Práve z hodnôt nadmorskej výšky v okolitých bunkách sa odvodzujú ďalšie parametre ako sklon či expozícia. Rozdiel medzi DEM a DTM je v tom, že DTM pracuje so všetkými typmi geoprvkov (body, línie a polygóny), na rozdiel od DEM. Oba reprezentujú povrch terénu bez akýchkoľvek objektov na ňom.

Podobnikar v [18] vysvetľuje rozdiel medzi DMT a DEM: DEM ako GRID obsahuje údaje len o nadmorskej výške, ktorej hodnoty sú uložené v bunkách a je vhodná pre ďalšiu analýzu v GIS. DTM zahŕňa všeobecnejšiu informáciu ako DEM a obsahuje ďalšie údaje popisujúce topografiu povrchu (sklon, zakrivenie, expozíciu, vrcholy, údolia a pod.)

Práve nástroje GIS umožňujú odvodenie všetkých morfometrických parametrov z DEM potrebných pre modelovanie lavínového rizika, a to sklon, expozíciu terénu, nadmorskú výšku či horizontálne a vertikálne zakrivenie.

5.1. Tvorba vstupných dát

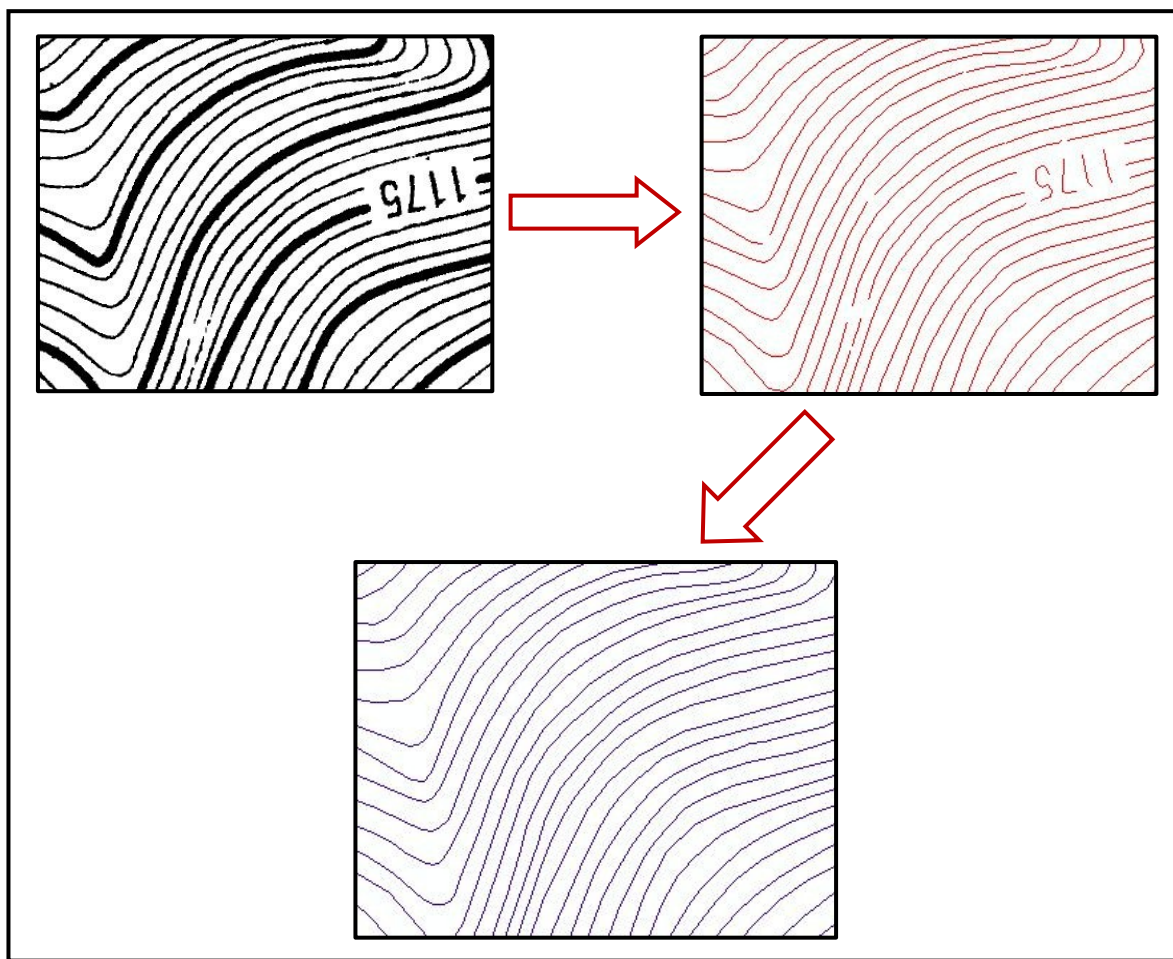
Výsledná presnosť modelovania závisí predovšetkým od presnosti vstupných dát a z nich odvodených morfometrických vlastností reliéfu. Reliéf môže byť reprezentovaný rôznymi spôsobmi, najčastejšie však prostredníctvom vrstevníc. Sú to izolínie, spájajúce miesta s rovnakou hodnotou nadmorskej výšky a využívané najmä v topografických mapách. Ďalšími reprezentáciami poskytujúcimi informácie o reliéfe sú GRID a TIN (nepravidelná trojuholníková sieť).

Nevýhodou reprezentácie povrchu prostredníctvom vrstevníc je hlavne jej nespojitosť, pretože vrstevnice poskytujú informáciu o nadmorskej výške len v tých bodoch, ktorými prechádzajú. Pre odvodenie výškových pomerov vo všetkých miestach je potrebná vhodná interpolácia. Podmienkou vytvorenia digitálneho modelu terénu v prostredí GIS boli vrstevnice vo vektorovej podobe.

Pre túto bakalársku prácu a zvolené územie – dolinu Šútovského potoka boli poskytnuté vrstevnice v rastrovej forme (oskenovaná mapa s extrahovanou informáciou o priebehu vrstevníc), v ktorej sú pre ďalšie analýzu nevhodné. Z toho dôvodu bola potrebná ich

digitalizácia a priradenie atribútových dát. Celé územie spadalo do 6 mapových listov základnej mapy 1: 10000 s ekvidištantou vrstevníc 5 m, ktoré boli v súradnicovom systéme S-JTSK.

Vektorizácia bola vykonaná prostredníctvom nadstavby ArcScan pre ArcGIS. Je to nástroj, ktorý sa používa pre automatické a poloautomatické generovanie vektorových dát z naskenovaných máp a náčrtov, čo výrazne zjednodušuje proces získavania dát.[23] V dôsledku nepresného naskenovania mapových listov do digitálnej podoby vznikali vo výsledku automatickej vektorizácie chyby, ktoré bolo potrebné ručne opraviť a zabezpečiť, aby vrstevnice po oprave presne odpovedali vstupným dátam v rastrovej podobe. Ručne bolo potrebné taktiež pospájať línie na okrajoch mapových listov, aby vrstevnice v záujmovom území boli spojené. Proces opravy výsledku automatickej vektorizácie bol značne zdĺhavý, keďže sa jednalo o veľkú mierku na pomerne rozsiahlom území. Líniám bol následne pripravený atribút nadmorskej výšky. Vzniknutá vektorová vrstva vrstevníc bola použitá ako vstup v module Topo To Raster v prostredí ArcGIS 9.3 pre vytvorenie potrebného výškového modelu.



Obr. 9: Postup prípravy dát – vstupom boli vrstevnice v rastrovej forme, ktoré boli automaticky zvektorizované a následne boli opravené chyby a pridaný atribút nadmorskej výšky, zdroj: autor

5.2. Software

Pre prípravu dát, ich následné spracovanie, vykonanie analýz, vizualizáciu a vytvorenie výstupov bol použitý software ArcGIS Desktop 9.3 od firmy ESRI. ESRI je svetovým lídrom v oblasti tvorby softwaru pre GIS, ktorý je využívaný vo veľkom množstve oblastí.

Firma ESRI označuje názvom ArcGIS produkt obsahujúci sadu softwarových aplikácií pre servery, desktop či mobilné platformy.

ArcGIS Desktop obsahuje množstvo vzájomne prepojených aplikácií ako ArcMap, ArcEditor, ArcToolbox a ModelBuilder umožňujúce tvorbu, analýzu, vizualizáciu, správu, zdieľanie a publikovanie geografických dát. Zahŕňa 3 úrovne licencie: ArcView, ArcEditor a ArcInfo. Všetky poskytujú rôznu úroveň funkcionality.[23] Popísať extenzie – 3D Analyst a Spatial Analyst.

Pri spracovaní dát boli využité extenzie Spatial Analyst a 3D Analyst. ArcGIS Spatial Analyst ponúka širokú škálu nástrojov pre priestorové modelovanie a analýzu, ktorý umožňuje vytvárať, zobrazovať a analyzovať rastrové dáta.[23] Prostredníctvom tejto extenzie boli vypočítané parametre topografie na základe digitálneho výškového modelu. ArcGIS 3D Analyst efektívne vizualizuje a analyzuje dáta reprezentujúce povrch. Poskytuje nástroje pre tvorbu 3D povrchov a ich analýzu.[23] Táto nadstavba obsahuje aj špecializovaný software ArcScene, ktorý umožňuje analýzu a prehliadanie dát v 3D, ktorý bol využitý pre vizualizáciu výstupov.

6. Modelovanie lavínového nebezpečenstva

Postup modelovania lavínového rizika zahŕňa 3 podprocesy:

1. identifikácia odtrhových zón - modelovanie oblastí vzniku lavín
2. modelovanie lavínových dráh - modelovanie tvaru lavínovej dráhy
3. modelovanie lavínových dosahov - modelovanie maximálneho dosahu vzniknutých lavín

Identifikácia potenciálnych odtrhových zón je kľúčovým procesom pri odhade lavínového nebezpečenstva. Na základe typu a výšky odtrhu je možné odhadnúť objem lavíny a z nej vyplývajúce riziko. Pri odtrhu menšieho objemu snehu sa nepredpokladá vznik mohutnej lavíny, ani jej rapidne narastanie v priebehu jej pohybu. Naopak väčšie masy snehu pri odtrhu lavín sú predpokladom pre vytvorenie veľkých lavín s dlhými lavínovými dráhami a ničivými následkami.

GIS nástroje umožňujú potenciálne lavínové zóny odtrhu stanoviť prostredníctvom mapovej algebry. Vstupom sú všetky faktory podieľajúce sa na tvorbe rizika vzniku lavínových udalostí. Presnejšie výsledky je možné dosiahnuť analýzou historických lavínových javov zo štatistík a im odpovedajúcich morfometrických parametrov a zahrnutím ich vplyvu do výpočtu.

Výsledky z modelovania zón odtrhu následne tvoria vstupné dáta pre modelovanie potenciálnych lavínových dráh či dosahov lavín. Modelovanie dynamiky a správania sa lavín v priebehu ich pohybu je náročným procesom.[19]

V rámci tejto práce budú predovšetkým identifikované potenciálne lavínové odtrhové zóny a následne bude vybraný lavínový odtrh, ktorý bude použitý pre modelovanie lavínovej dráhy a jej dosahu prostredníctvom dynamického numerického modelu RAMMS.

6.1. Štatistický rozbor lavínovej databázy

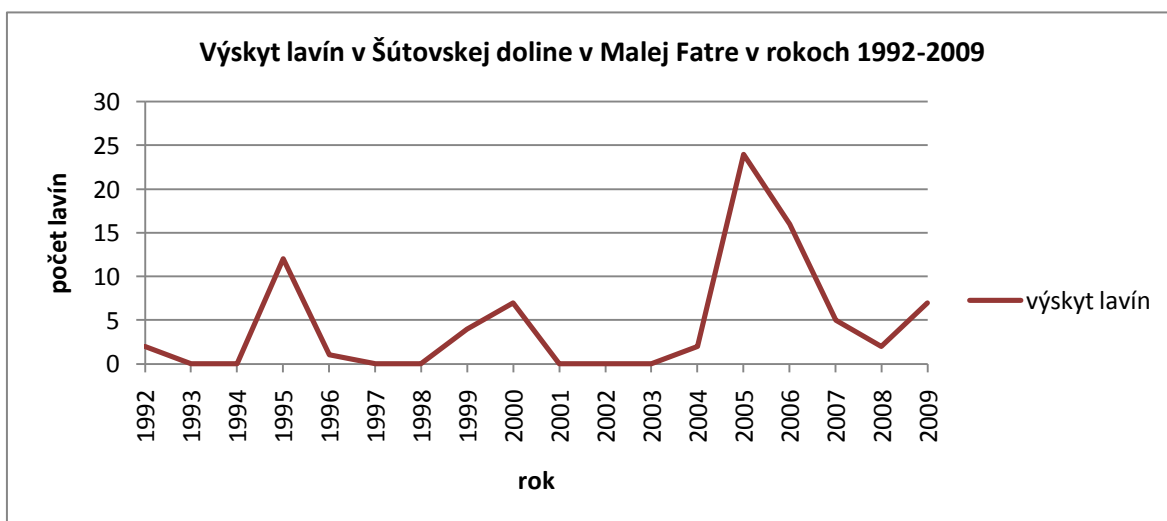
Všetky lavínové udalosti horstiev Slovenska sú priebežne zaznamenávané Strediskom lavínovej prevencie HZS v Jasnej do lavínovej databázy (SLPDB), ktorá bola vytvorená M.Vojtekom. Pre potreby tejto bakalárskej práce a zahrnutie vplyvu topografických faktorov vo vybranom území do výsledku boli údaje z tejto databázy poskytnuté pre územie Šútovskej doliny.

V poskytnutej databáze sú obsiahnuté údaje o zaznamenaných lavínach od roku 1992 a obsahujú informácie o nadmorskej výške, sklone či expozícii odtrhu, počte lavín, type odtrhu, taktiež informácie o približnom množstve preneseného snehu (objeme lavín), šírke nánosov či spôsobených materiálnych škodách alebo zasiahnutých a zranených ľudí a prípadných ľudských obetiach. Táto databáza teda predstavuje komplexný popis historických lavínových javov spájajúca údaje o pásmach odtrhu, transportu i pásme nánosov a tiež o ich dôsledkoch. Pre zvolené územie boli zaznamenávané lavínové javy systematicky iba od roku 1992, avšak pre kalibráciu modelu budú tieto údaje postačujúce.

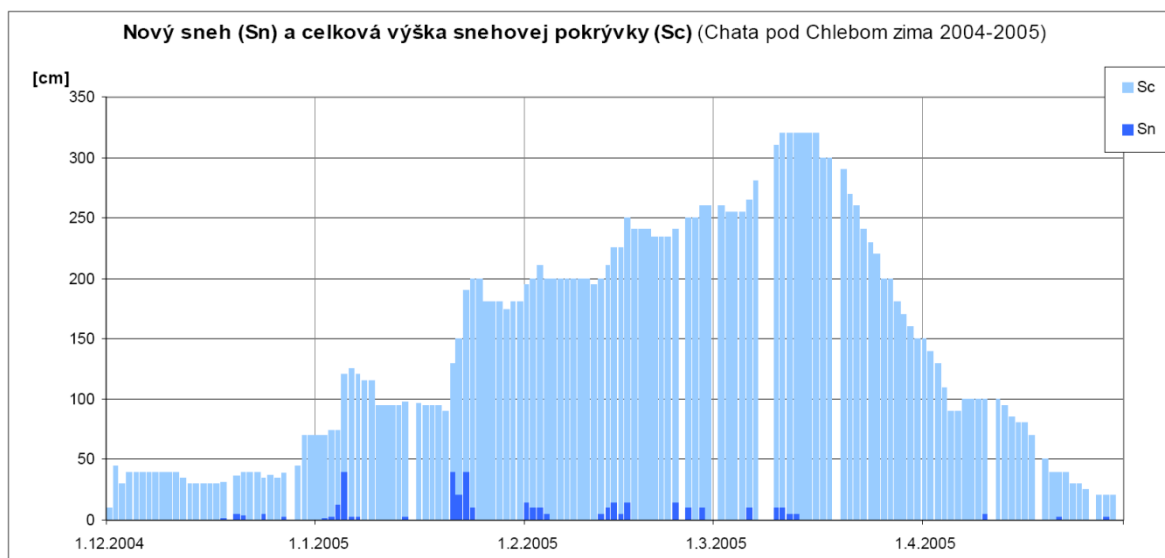
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	vyskyt_od	vyskyt_do	hodina	pravd_datum	pocet_lavin	pindex	vyska_odtrhu	celo_nanosu	laviny.expozicia	aspect	sklon_odtrhu	celkovy_sklon	objem	samhech	clov	zvodst		
2	27.3.1995			27.3.1995	1		1430	1220 JZ		225	5	0,53	3600	ano	ne	ne	ne	ne
3	24.4.1995			24.4.1995	1		1475	1280 J		180		0,78	3000	ano	ne	ne	ne	ne
4	27.2.1999	28.2.1999			1		1450	1200 JZ		225	5	0,5		ano	ne	ne	ne	ne
5	29.3.2000			29.3.2000	1		1505	1013 JJZ		202,5	5	0,34	70000	ano	ne	ne	ne	ne
6	29.11.2004	1.12.2004			1		1420	JJZ			6			ano	ne	ne	ne	ne
7	28.3.2005	30.3.2005			1		1475	1050 JZ			6			ano	ne	ne	ne	ne
8				13.1.2006	1		1400	JJZ						ano	ne	ne	ne	ne
9	12.3.2009			13.3.2009	1		1480	JZ			6			ano	ne	ne	ne	ne
10	28.3.2009	30.3.2009			1		1450	1150 J			6			ano	ne	ne	ne	ne
11	19.1.2000	20.1.2000			1		1400	1250 Z		270	5	0,45	45000	ano	ne	ne	ne	ne
12	29.3.2000			29.3.2000	1		1435	1350 J		180	5	0,57	4500	ano	ne	ne	ne	ne
13	5.1.2006	9.1.2006			1		1460	1280 Z			5			ano	ne	ne	ne	ne
14	24.1.2000	27.1.2000			1		1300	1128 JV		135	4	0,86	6000	ano	ne	ne	ne	ne
15	17.4.2000			17.4.2000	1		1325	1100 JV		135	5	0,75	250000	ano	ne	ne	ne	ne
16	16.3.2005	19.3.2005			1		1420	1040 V			5			ano	ne	ne	ne	ne
17	28.3.2005	30.3.2005			1		1480	JV			5			ano	ne	ne	ne	ne
18	2.1.2006	9.1.2006			1		1450	1050 V			5			ano	ne	ne	ne	ne
19	18.3.1995			18.3.1995	1		1475	1200 JV		135		0,64	3600	ano	ne	ne	ne	ne
20	25.3.1995	27.3.1995			1		1425	1100 V		90	5	0,54	9000	ano	ne	ne	ne	ne
21	27.3.1995			27.3.1995	1 B		1425	980 V		90	5	0,4	37500	ano	ne	ne	ne	ne
22	20.4.1995	24.4.1995			1		1475	1050 JV		135	5	0,53	25000	ano	ne	ne	ne	ne
23	19.2.1996	21.2.1996			1 B		1325	1125 JV		135		0,44	2250	ano	ne	ne	ne	ne
24	1.3.1999	30.3.1999			1		1450	990 J		180		0,47		ano	ne	ne	ne	ne
25	28.3.2000			28.3.2000	1 A		1475	1000 J		180	5	0,47		ano	ne	ne	ne	ne
26	28.3.2000			28.3.2000	1 B		1425	980 V		90	5	0,47	24000	ano	ne	ne	ne	ne
27	29.11.2004	13.12.2004			1		1500	VJV			5			ano	ne	ne	ne	ne
28	10.1.2005	11.1.2005			1		1480	JV			5			ano	ne	ne	ne	ne
29	16.3.2005	19.3.2005			1 A		1380	VJV			4			ano	ne	ne	ne	ne
30	16.3.2005	19.3.2005			1		1400	VJV			5			ano	ne	ne	ne	ne
31	28.3.2005	30.3.2005			1 A		1480	990 JV			3			ano	ne	ne	ne	ne
32	28.3.2005	30.3.2005			1 B		1450	990 VSV			6			ano	ne	ne	ne	ne
33				21.3.2006	1		1510	1000 V			4			ano	ne	ne	ne	ne
34	28.1.2006	31.1.2006			1		1275	JV			5			ano	ne	ne	ne	ne
35				22.2.2007	1		1450	1000 V						ano	ne	ne	ne	ne
36				10.3.2007	1 B		1425	1150						ano	ne	ne	ne	ne
37					1 A		1480	VJV			4			ano	ne	ne	ne	ne
38	2.4.1999			2.4.1999	1 B		1400	925 J		180	5	0,7		ano	ne	ne	ne	ne
39	16.3.2005	19.3.2005			1 B		1430	V			4			ano	ne	ne	ne	ne
40	16.3.2005	19.3.2005			1 A		1420	VJV			5			ano	ne	ne	ne	ne

Obr. 10: Záznamy z lavínovej databázy pre Šútovskú dolinu, zdroj: autor

V priebehu rokov 1992-2009 bolo v Šútovskej doline pozorovaných 82 lavín. Všetky z nich mali čiarový odtrh, bodový odtrh zaznamenaný nebol. Vo všetkých prípadoch došlo k samovoľnému odtrhu lavíny. Najviac lavín bolo evidovaných v roku 2005, a to 24. Zvýšený počet bol pozorovaný taktiež v rokoch 1995 a 2000. Táto skutočnosť bola podmienená predovšetkým nevhodnými meteorologickými podmienkami a veľkou výškou snehovej pokrývky. Napríklad v zime 2004/2005 sa na danom území pohybovala výška snehovej pokrývky od januára do apríla v rozmedzí 2 až 3 m, pričom teplota nevystúpila za toto obdobie nad bod mrazu.

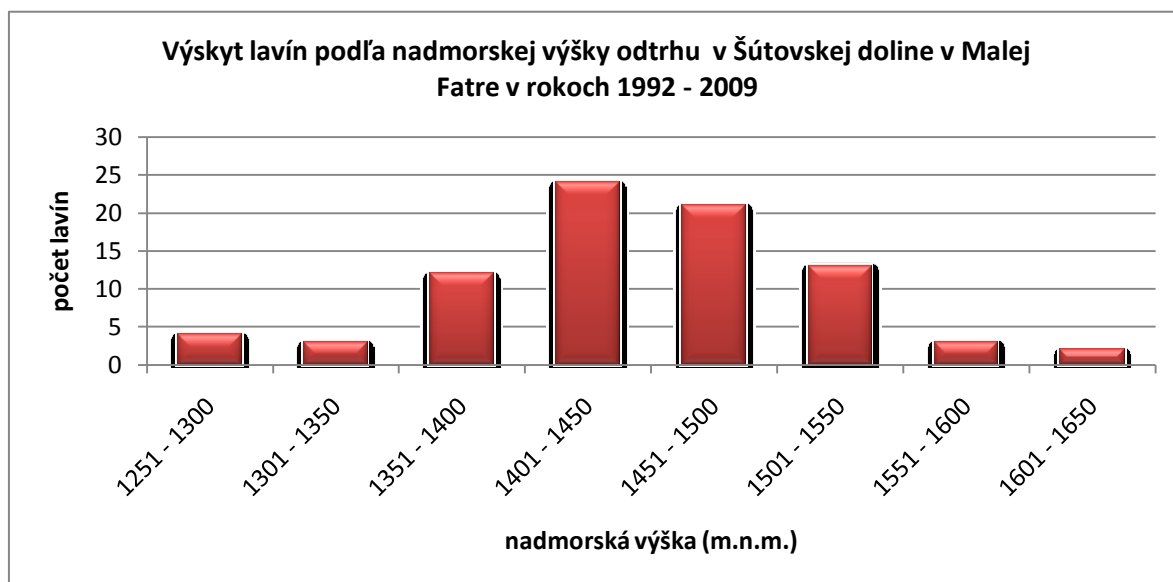


Graf 3: Výskyt lavínových udalostí v jednotlivých rokoch v intervale 1992-2009, zdroj: SLPDB, vytvoril: autor



Obr. 11: Zastúpenie výšky nového snehu a celkovej výšky snehovej pokrývky pre zimné mesiace 2004-2005, Chata pod Chlebom, zdroj: ročenka SLP 2004/2005

Priemerná nadmorská výška odtrhu bola 1455 m n.m., pričom najviac lavín vzniklo v intervaloch 1401 - 1450 m n.m. a 1451 - 1500, a to dohromady 45. Tieto nadmorské výšky sa vyskytujú nad hranicou lesa, kde je vegetácia zastúpená zväčša trávnatým porastom, kosodrevinou resp. nízkymi krovinami. Snež je tak slabo stabilizovaný a vzniká v ňom napätie. V grafe č. 4 je znázornené zastúpenie počtu lavín podľa nadmorskej výšky.

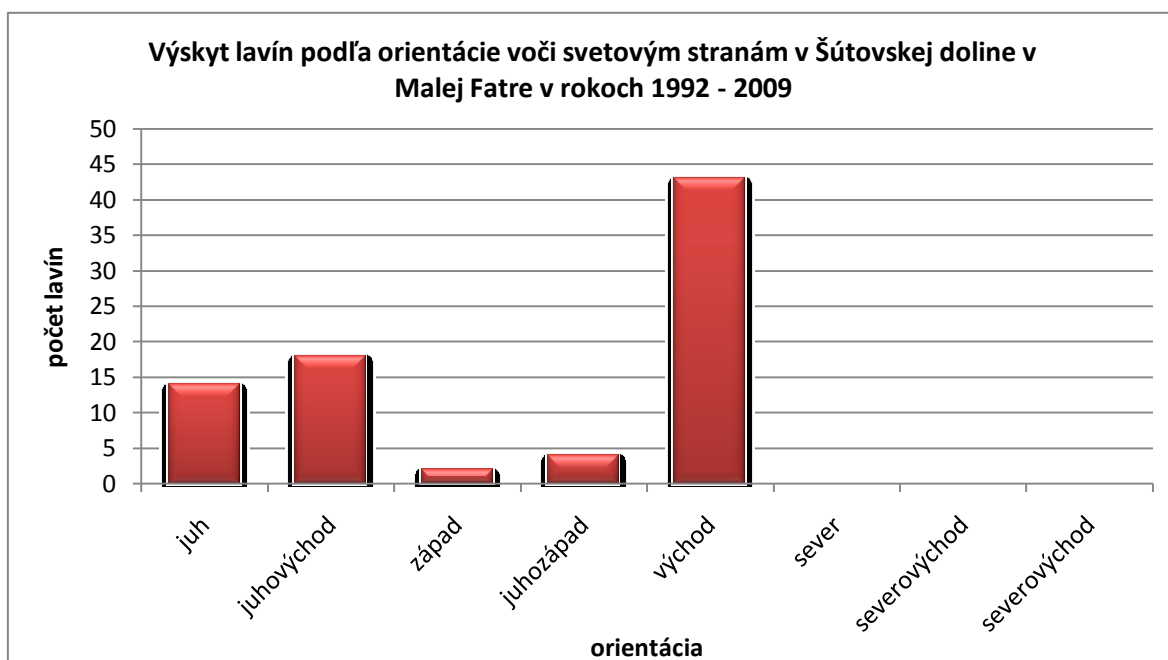


Graf 4: Výskyt lavín podľa nadmorskej výšky odtrhu v Šútovskej doline v rokoch 1992 - 2009, zdroj: SLPDB, vytvoril: autor

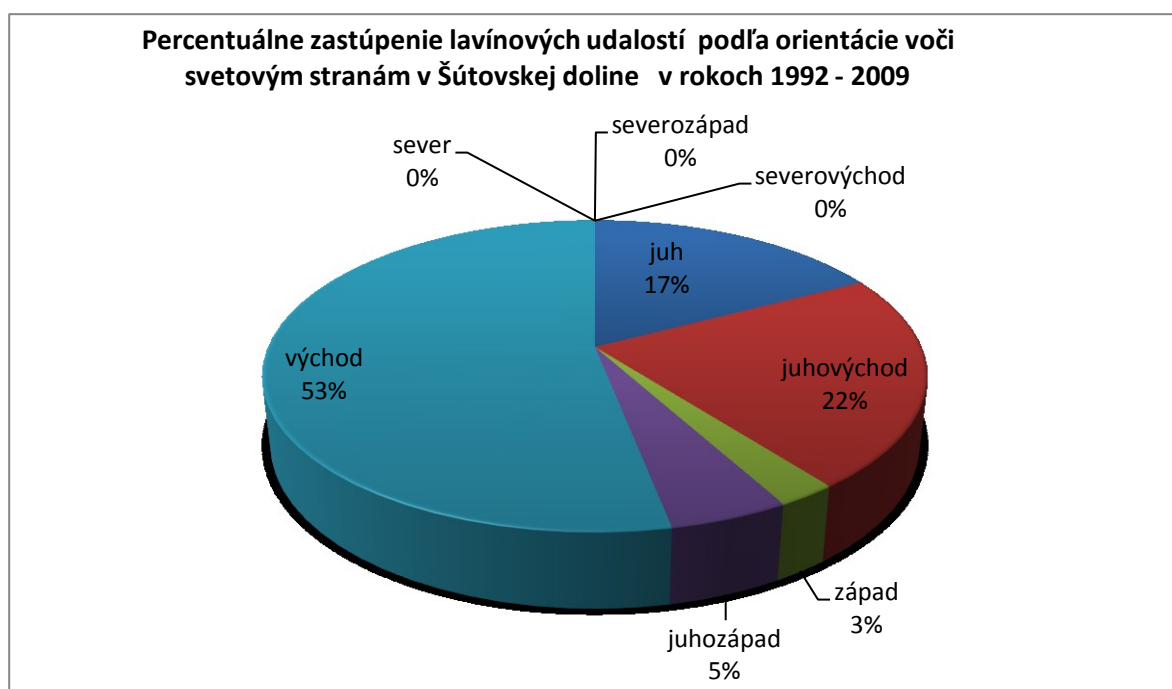
Z hľadiska expozície svahov, na ktorých došlo k zosuvu lavín, bolo zo všetkých 82 lavínových udalostí evidovaných 43 s orientáciou na východ, čo predstavuje viac ako polovicu zo všetkých lavín. Je to spôsobené tým, že na zvolenom území je väčšina

nezalesnených svahov práve s touto expozíciou. Naopak lavíny so severnou, severovýchodnou či severozápadnou orientáciou nie sú zaznamenané. Aj keď sa táto skutočnosť javí ako paradoxná, je to spôsobené tým, že tieto svahy sú zastúpené v menšej miere príp. sú zalesnené.

Nadmorská výška a expozícia terénu je podrobnejšie rozoberaná v ďalšej kapitole, nakoľko bude ich vplyv pre danú oblasť zahrnutý do výpočtu odtrhových zón lavín.



Graf 5: Výskyt lavín podľa expozície terénu v Šútovskej doline v rokoch 1992-2009, zdroj: SLPDB, vytvoril: autor



Graf 6: Percentuálne zastúpenie lavínových udalostí podľa orientácie voči svetovým stranám v Šútovskej doline v rokoch 1992 – 2009, zdroj: SLPDB, vytvoril: autor

Prevažná väčšina lavín vo zvolenom území bola z mokrého snehu, teda prevažovali základové lavíny, ktoré sú najčastejšie pozorované na prelome zimných a jarných mesiacov na svahoch s východnou či južnou orientáciou.

Priemerná dĺžka lavínových dráh činí 650 metrov s priemernou minimálnou šírkou dráhy 47 metrov. Pásmo nánosov bolo poväčšine tvorené hrubými časticami, keďže viaceré lavíny boli základové, pri ktorých sa tvoria hrudy a kvádre. V 16 prípadoch došlo k poškodeniu lesného porastu.

Je potrebné podotknúť, že niektoré údaje neboli v databáze obsiahnuté, resp. nedošlo k ich záznamu a taktiež mohlo dôjsť v určitých prípadoch k omylu (napr. z hľadiska tvaru dráhy - žľabová i plošná lavína súčasne a pod.) V týchto prípadoch by nebolo vhodné vypočítavať percentuálny podiel či presnú početnosť.

6.2. Identifikácia odtrhových zón

Pre výpočet potenciálnych odtrhových zón je rozhodujúca topografia povrchu. Do tohoto výpočtu v prostredí GIS budú zahrnuté všetky parametre odvodené z DTM (DMR) a vrstva krajinej štruktúry, pre zahrnutie vplyvu drsnosti povrchu. Pre stanovenie odtrhových zón boli Bárkom, Rybárom či Hreškom odvodené rôzne modely na základe štatistických záznamov o lavínových udalostiach a ich morfometrických parametrov.

Tieto modely boli upravené Biskupičom v [2] na tvar:

$$A_v = (A_l + E_x + F_x + F_y) * S * R_g$$

V tomto modeli je výsledná hrozba vzniku lavín (A_v) vypočítaná ako súčet faktorov nadmorskej výšky (A_l), expozície terénu (E_x), horizontálneho zakrivenia (F_x) a vertikálneho zakrivenia (F_y) násobený faktorom sklonu (S) a drsnosti povrchu (R_g) odvodeným z vrstvy vegetačného krytu.

Všetky hodnoty jednotlivých faktorov zahrnutých do modelu však musia byť reklasifikované podľa rizika, ktoré predstavujú pre vznik lavín. Tieto reklasifikované hodnoty sa pohybujú u väčšiny faktorov od 0 do 2, pri faktore drsnosti povrchu od 0 do 3. Vyššia hodnota predstavuje väčšie riziko pre potenciálny vznik lavínových javov a nižšia hodnota predstavuje malé riziko.

Faktor sklonu je reklasifikovaný podľa hodnôt použitých Bárkom a Rybárom v [1], pričom nie je nutné tieto hodnoty meniť vzhľadom na nemennosť rizika a dlhodobých pozorovaní z historických lavínových javov.

Tab. 4: Reklasifikácia hodnôt sklonu, zdroj: autor, upravené podľa [1]

Sklon [°]	Váha faktoru	Popis
0° - 10°, 71° - 90°	0	príliš malý sklon na vznik lavín na svahoch so sklonom do 19°, svahy so sklonom nad 61° neumožňujú tvorbu súvislej snehovej pokrývky a sneh sa priebežne zosypuje, výskyt lavínových udalostí so sklonom v týchto intervaloch je veľmi zriedkavý
11° - 19°, 61° - 70°	0,4	
20° - 25°, 56° - 60°	0,8	
26° - 30°, 51° - 55°	1,2	rizikové sklony pre vznik lavín, pomerne častý výskyt lavínových udalostí pozorovaných so sklonom v týchto intervaloch
31° - 34°, 46° - 50°	1,6	
35° - 45°	2	najrizikovejší sklon pre vznik lavín, väčšina lavínových udalostí je pozorovaná s takýmto sklonom

Reklasifikácia faktorov horizontálnej a vertikálnej krivosti vychádza z [2] a je charakteristická pre členité horské oblasti. Horizontálne zakrivenie, teda zakrivenie v smere vrstevníc, bolo upravené do tvaru:

Tab. 5: Reklasifikácia hodnôt horizontálneho zakrivenia, zdroj: autor, upravené podľa [2]

Hodnota	Váha faktoru	Popis	Charakteristika
-4 - -0,2	1	konkávne tvary	pri konkávných a lineárnych tvaroch dochádza k akumulácii snehu a zvyšovaniu rizika vzniku lavín
-0,2 - 0,2	1	lineárne tvary	
0,2 - 0,5	0,7	mierne konvexné tvary	sneh nie je prenášaný vplyvom vetra vo veľkej miere
0,5 - 4	0,5	konvexné tvary	pri výrazne konvexných tvaroch je sneh prenášaný vplyvom vetra

V prípade vertikálnej krivosti, teda v smere spádnic, je reklasifikácia podobná, avšak konkávne tvary majú kladné hodnoty a konvexné tvary záporné hodnoty.

Tab. 6: Reklasifikácia hodnôt vertikálneho zakrivenia, zdroj: autor, upravené podľa [2]

Hodnota	Váha faktoru	Popis	Charakteristika
4 - 0,2	1	konkávne tvary	pri konkávných a lineárnych tvaroch dochádza k akumulácii snehu a zvyšovaniu rizika vzniku lavín
0,2 - -0,2	1	lineárne tvary	
-0,2 - -0,5	0,7	mierne konvexné tvary	sneh nie je prenášaný vplyvom vetra vo veľkej miere
-0,5 - -4	0,5	konvexné tvary	pri výrazne konvexných tvaroch je sneh prenášaný vplyvom vetra

Faktor drsnosti povrchu zahŕňa všetky typy povrchov vyskytujúcich sa na danom území. Keďže voľne dostupná vrstva vegetačného krytu z projektu CORINE Landcover pre požadovanú presnosť nepostačovala, nakoľko pre zvolené územie Šútovskej doliny zahŕňala iba 2 kategórie typu povrchu, bolo potrebná ručná digitalizácia s využitím ortofotosnímkov z roku 2008.

Bolo vytvorených 8 kategórií typu povrchu a ďalšie 3 kategórie, ktoré sú v nasledujúcej tabuľke uvedené ako ostatné. Jedná sa o kategórie ako zastavaná plocha, vodná plocha a lom, ktorých vplyv vo výpočte je nulový. Z toho dôvodu im bola priradená váha s hodnotou 0. Ostatným kategóriám boli váhy priradené a upravené na základe [19]. Po

terénom prieskume som sa rozhodol do tejto vrstvy zaradiť aj kategóriu – vysadená kosodrevina, ktorá bola vysadená v miestach častých lavínových zosunov so snahou zmierniť riziko ich vzniku. Táto kategória by sa dala na základe ortofotosnímkov vzhľadom ku svojmu nízkemu vzrastu zanedbať, avšak od roku 2008 došlo k jej rastu, čo s určitosťou do istej miery ovplyvní výpočet rizika na takýchto miestach.

Tab. 7: Reklasifikácia faktoru drsnosti povrchu, zdroj: autor, upravené podľa [19]

Typ povrchu	Váha faktoru	Charakteristika
ihličnatý les	0,5	predstavuje najmenšie riziko pre vznik lavín
listnatý, zmiešaný les	0,7	opadané lístie spôsobuje akumuláciu väčšieho množstva snehu
nesúvislý les zmiešaný s kosodrevinou	1,2	miesta bez prítomnosti stromov vytvárajú nestabilné plochy, na takýchto miestach je však riziko odtrhu lavín nízke
Kroviny	1,4	pri vyššej snehovej pokrývke neposkytujú ochranu pred lavínami
riedky les (stromy a tráva)	1,5	trávnatý porast spolu s riedkym porastom pôsobia značne nestabilizujúco
súvislá kosodrevina, svahy s výčnelkami skalného podložia	2,5	kosodrevina predstavuje ochranu pred tvorbou lavín a taktiež spomaľuje ich pohyb, avšak iba pokým snehová pokrývka nepresahuje jej výšku
nízka vysadená kosodrevina	2,8	predstavuje čiastočnú ochranu na svahoch s malým množstvom snehu
nesúvislá kosodrevina, drobno úlomkovité sutinové svahy, skalné platne, tráva	3	riziko výskytu lavín je výrazné, drsnosť povrchu je príliš malá, prípadné skalné úlomky bývajú rýchlo prikryté vrstvou snehu
ostatné (zastavaná plocha, vodná plocha, lom)	0	povrchy nepredstavujúce nebezpečenstvo lavínových udalostí

Faktor nadmorskej výšky a expozície terénu bol zhodnotený na základe databázy strediska lavínovej prevencie v Jasnej (SLP) z pozorovaných lavínových udalostí v Šútovskej doline. V prípade nadmorskej výšky boli vytvorené intervaly s odpovedajúcim počtom výskytov lavín, z ktorého bol následne vypočítaný percentuálny podiel a pridelená váha. Je evidentné, že so vzrastajúcou nadmorskou výškou stúpal počet lavínových udalostí až po interval 1300 – 1400 metrov, kde bol pozorovaný najvyšší počet lavín. Po tomto intervale sa počet znižoval, čo mohlo spôsobiť viacero faktorov ako napr. teplotná inverzia, pri ktorej je vo vyšších polohách vyššia teplota ako v nižších. Ďalším faktorom mohla byť skutočnosť, že v intervale 1500 – 1600 metrov, teda v miestach pod hrebeňom, nedochádza k vzniku dostatočne veľkého napätia v snehovej pokrývke, ktoré by spôsobilo odtrh. Miesta pod hrebeňom môžu byť taktiež ovplyvnené vetrom, ktorý odvieva sneh z náveterných svahov.

Hodnoty vypočítaných váh sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Tab. 8: Reklasifikácia hodnôt nadmorskej výšky, zdroj: SLPDB, vytvoril: autor

Nadmorská výška (m)	Počet udalostí	Percentuálny podiel	Váha faktoru	Charakteristika
1200-1300	4	4,88	0,2	interval s nízkym počtom výskytu lavín
1300-1400	15	18,29	0,7	zvýšený výskyt lavín vplyvom nižšej teploty a zrážok
1400-1500	45	54,88	2,0	najrizikovejší interval nadmorskej výšky, výskyt viac ako polovice všetkých lavínových udalostí
1500-1600	16	19,51	0,7	znížený počet vplyvom vetra a menšieho napätia v snehovej pokrývke
1600-	2	2,44	0,1	ojedinelý výskyt lavínových udalostí, len 2,5% zo všetkých pozorovaných lavín, zlý predpoklad pre vznik (hrebene)

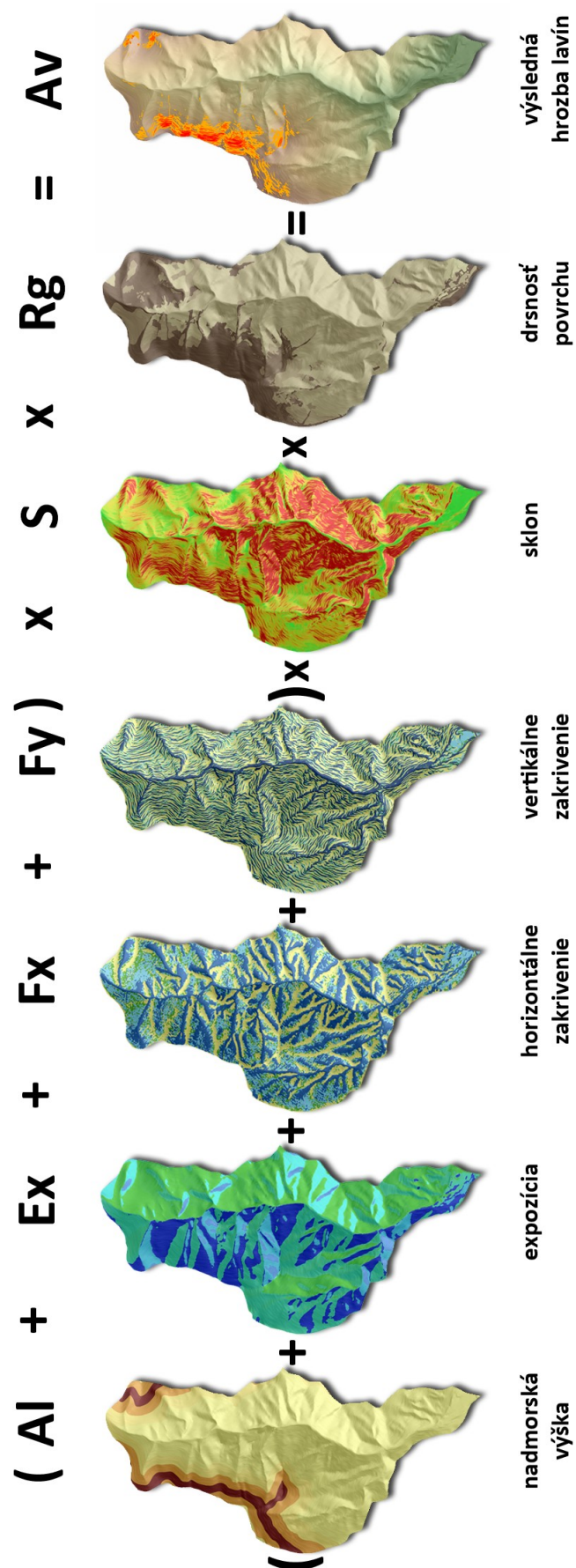
Faktor expozície terénu bol zhodnotený rovnakým spôsobom a váhy boli vypočítané na základe pozorovaných udalostí vo zvolenom území. V lavínovej databáze SLP neboli však pre Šútovskú dolinu evidované lavíny so severnou, severozápadnou a severovýchodnou orientáciou. Reklasifikácia pre tieto orientácie je však nutná, keďže vo vrstve krajinej štruktúry takéto svahy zastúpené sú. Podľa alpskej dlhodobej štatistiky je až 65% všetkých lavínových nešťastí pozorovaných na svahoch orientovaných na sever a východ.[12] Táto skutočnosť bola zohľadnená pri pridelovaní váh týmto orientáciám.

Z pozorovaných lavínových javov v Šútovskej doline vyplýva, že viac ako polovica z celkového počtu javov sa vyskytla na východných svahoch. Veľký počet lavín bolo evidovaných taktiež na južných a juhovýchodných svahoch, na ktorých hlavne počas jarných mesiacoch vplyvom slnečného žiarenia dochádza k narušaniu stability snehu a tvorbe predovšetkým základových lavín. Západné a juhozápadné svahy sú do značnej miery zalesnené, čo sa aj prejavuje nižším počtom lavínových udalostí na takto orientovaných svahoch.

Vypočítané váhy sú uvedené v tabuľke:

Tab. 9: Reklasifikácia faktoru expozície terénu, zdroj: SLPDB, vytvoril: autor

Orientácia	Počet udalostí	Percentuálny podiel	Váha faktoru	Charakteristika
juh	14	17,28	0,7	pomerné častý výskyt lavín v dôsledku vyššieho výskytu svahov s J a JV orientáciou, v dôsledku vplyvu slnečného žiarenia dochádza k narušeniu stability snehu
juhovýchod	18	22,22	0,8	
západ	2	2,47	0,1	ojedinelý výskyt lavín so Z a JZ orientáciou, väčšina takto orientovaných svahov v Šútovskej doline je zalesnená
juhozápad	4	4,94	0,2	
východ	43	53,09	2,0	východné svahy Šútovskej doliny sú z veľkej časti nezalesnené s väčším sklonom, je pozorovaný častý vznik lavín
sever	0	0	1,5	výskyt lavín na svahoch s takouto orientáciou nebol zaznamenaný, váha je pridelená na základe všeobecných pozorovaní a alpskej štatistiky. Na tienistých svahoch sa snehová pokrývka pomalšie stabilizuje, sú tam lepšie podmienky pre vznik povrchovej a dutinovej inovate.[6]
severovýchod	0	0	1,2	
severozápad	0	0	1	



Obr. 12: Postup výpočtu výsledného lavínového ohrozenia z reklasifikovaných vrstiev, zdroj: autor

6.2.1. Výsledky modelovania oblastí vzniku lavín

Po pridelení váh jednotlivým faktorom boli všetky faktory reklasifikované v prostredí ArcGIS 9.3 a následne boli pomocou nástroja Map Algebra s využitím zvoleného modelu vypočítané potenciálne zóny odtrhu. Z pridelených hodnôt jednotlivým faktorom vyplýva, že najvyššou hodnotou výsledného lavínového nebezpečenstva je 36, je teda najväčšou hrozbou. Všetky hodnoty sa teda pohybujú v rozmedzí hodnôt 0 - 36.

Tieto hodnoty boli rozdelené do 4 kategórií - podľa rizika lavínovej hrozby. Táto klasifikácia bola použitá podľa [1] a rozlišuje malú, strednú, veľkú a katastrofickú hrozbu vzniku odtrhu lavín.

Tab. 10: Reklasifikácia hodnôt výsledku (prevzaté z [1])

Výsledok rovnice	Hrozba vzniku lavíny
(0 - 15>	malá
(15 - 22,5>	stredná
(22,5 - 30>	veľká
(30 - 36>	katastrofická

Najrizikovejšie odtrhy vznikli na strmých trávnatých svahoch Stienok, Prednej a Zadnej Úboče a juhozápadných svahoch Stohu. Práve na týchto svahoch sa podľa lavínovej databázy odohralo najviac lavínových udalostí. Po zrovnaní s lavínovým katastrom sa väčšina najrizikovejších oblastí zhoduje so záznamom lavínových dráh. Rozdielne sa javili len svahy pod Hromovým, kde došlo k viac ako 12% zosuvom lavín, ale vo výsledku tieto svahy predstavujú prevažne malé nebezpečenstvo. Z týchto zistení vyplýva, že na území nedošlo k výrazným zmenám v krajinskej štruktúre. Pri terénnom prieskume bolo zistené, že všetky spomínané svahy sú pokryté výlučne trávnatým porastom, iba svahy Stohu sú pokryté nízkou vysadenou kosodrevinou, ktorá síce bráni vzniku lavín pri malej výške snehovej pokrývky, ale po prekrytí väčším množstvom snehu vzniká potenciálne nebezpečenstvo a riziko tvorby povrchových lavín.

Najrizikovejšia kategória – katastrofická hrozba vzniku lavíny je na zvolenom území zastúpená 2,68% rozlohy, čo predstavuje 7,26 ha z celkových 271,21 ha. Veľká hrozba predstavuje 10,40% a 28,21 ha a stredná hrozba odpovedá 31,93%, teda 86,61 ha rozlohy v skúmanej doline. Tieto 3 kategórie predstavujú hrozbu vzniku potenciálnych lavínových odtrhov a poskytujú informáciu o rizikových zónach v doline Šútovského potoka. Malá hrozba predstavuje najnižšie riziko z pohľadu vzniku lavín a zahŕňa miesta, kde boli váhy jednotlivých faktorov najnižšie. Táto kategória je vo zvolenom území zastúpená rozlohou 149,13 ha, čo je 54,99% z celkovej rozlohy územia.

Pre porovnanie výsledku s lavínovým katastrom boli zvektorizované lavínové dráhy lavín, ku ktorým došlo v skúmanej oblasti minulosti a tieto vzniknuté polygóny z lavínového katastra boli zahrnuté do výslednej mapy spoločne s vypočítanou hrozbou. Mapa je súčasťou mapovej prílohy.

Je vidieť, že vypočítané rizikové miesta pre potenciálny vznik lavín sa vo veľkej miere zhodujú so záznamami lavínového katastra, čo môže do istej miery potvrdiť úspešnosť analýzy. Výsledok však odhalil aj miesta, ktoré v lavínovom katastri neboli doteraz zaznamenané a v praxi môžu poslúžiť pri prevencii v danej oblasti.

6.3. Modelovanie dráh a dosahov lavín

Pre potreby komplexného riešenia lavínového rizika v oblastiach s častým výskytom lavín boli vytvorené nástroje pre modelovanie ich dynamiky, teda modelovanie dosahu lavínových dráh, rýchlosti pohybu či tlaku v snehovej pokrývke v priebehu pohybu. Vytvorenie týchto nástrojov vyžadovalo detailné pozorovanie lavínových oblastí a štúdium historických udalostí v lavínovom teréne.

Jednorozmerný numerický model AVAL-1D je v súčasnosti využívaný predovšetkým v Rakúsku, Švajčiarsku a Taliansku. Napriek tomu, že je často používaný, vyžaduje definíciu smeru toku lavíny či šírku toku už vopred, čo je obzvlášť náročné v otvorenom teréne, alebo teréne s viacerými žľabmi.[9]

Pre riešenie týchto nedostatkov bol vyvinutý dvojrozmerný simulačný model RAMMS.

6.3.1. RAMMS (RAPid Mass MovementS)

RAMMS je nástroj určený pre numerické simulácie lavín vytvorený lavínovými expertmi a odborníkmi vo WSL Institute for Snow and Avalanche Research - SLF vo švajčiarskom Davose. Dynamický model RAMMS umožňuje určiť v trojrozmernom teréne dosah lavín, rýchlosť prúdenia snehových más, ich množstvo či v nich vyvinutý tlak. V súčasnosti predstavuje spoľahlivý nástroj určený na simuláciu a modelovanie pohybu lavín a predikciu lavínového nebezpečenstva vznikajúceho v horskom prostredí, a tým pomáha pri lavínovej prevencii a návrhu protiopatrení. Na kalibráciu tohto modelu boli použité merania a dynamické testy v oblasti Valeé de La Sionne vo Švajčiarsku a historické dáta lavínových javov vo Švajčiarskych Alpách. Tento software je komerčný a je využívaný v praxi či pre vedecké účely s možnosťou zakúpenia licencie na štyri, tri, dva, alebo pol roka s cenou od 900 CHF za polročnú licenciu pre vedecké účely a univerzity.

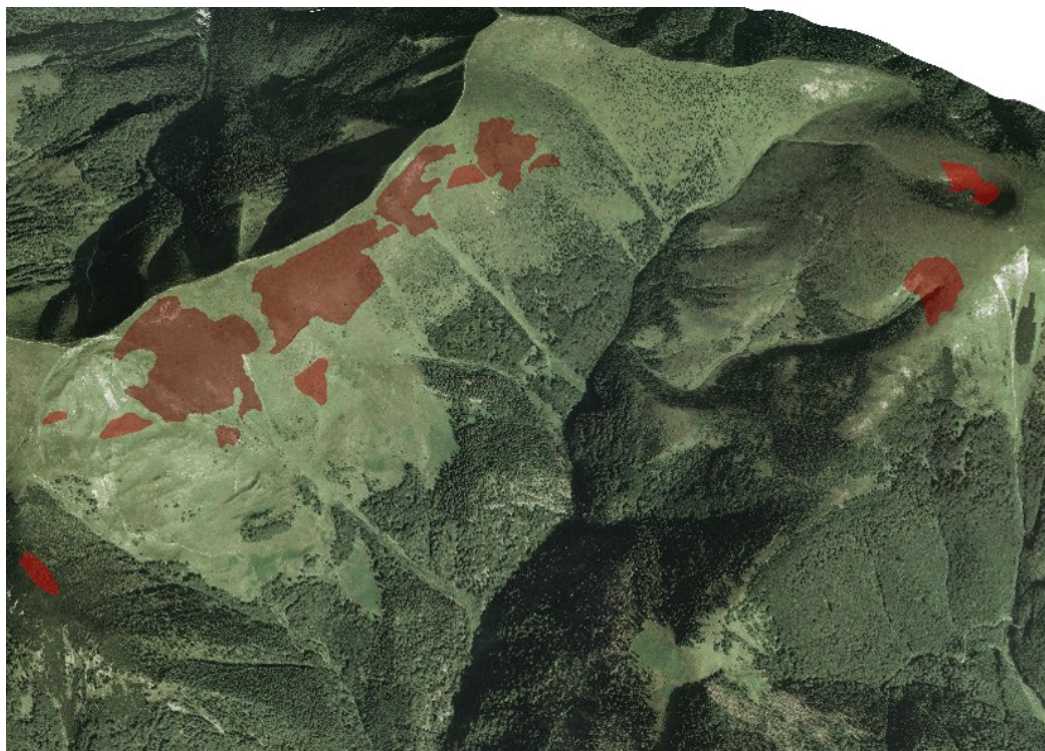
Dynamický model RAMMS v súčasnosti nie je využívaný pre štúdium lavínovej problematiky v horstvách Slovenska, ale jeho prípadná implementácia v budúcnosti by mohla slúžiť ako doplnenie už existujúceho lavínového katastra.

Práve model RAMMS bol použitý v pre modelovanie dynamiky lavín v tejto práci s cieľom posúdiť rýchlosť, tlak a výšku snehových más v priebehu zosuvu a výšku snehu pásme nánosov.

6.3.2. Modelovanie dynamiky lavín s využitím RAMMS

Pre modelovanie lavínových dráh a dosahov boli zo získaného výsledku identifikácie potenciálnych lavínových odtrhov zvektorizované polygóny odtrhu a následne bol zvolený jeden odtrh nachádzajúci sa na svahu Prednej Úboče. Tieto odtrhové polygóny boli vytvorené z 2 kategórií – veľkej a katastrofickej hrozby. V častiach pod hrebeňom boli polygóny vytvárané podľa hraníc zvektorizovaných dráh z lavínového katastra, aj napriek tomu, že sa rizikové miesta vyskytovali aj nad touto hranicou. Príčinou bola skutočnosť, že lavíny vznikajú až od určitej vzdialenosti pod hrebeňom, pretože k odtrhu je potrebné určité napätie v snehovej pokrývke.

Výsledok modelovania závisí predovšetkým od vstupných dát, ktorými sú digitálny výškový model (DEM), odtrhové zóny či informácie o zalesnení. Okrem vstupných dát je potrebné stanoviť jednotlivé parametre výpočtu ako informácie o zvolenom odtrhu, frikčné parametre či globálne parametre výpočtu.

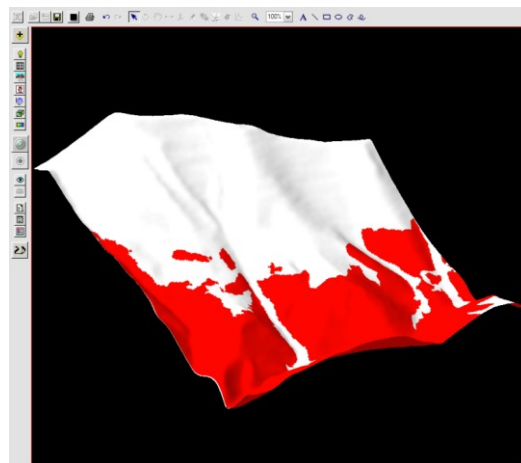


Obr. 13: Vytvorené odtrhové polygóny z vypočítaného lavínového ohrozenia. Zdroj: autor.

Vstupné dáta:

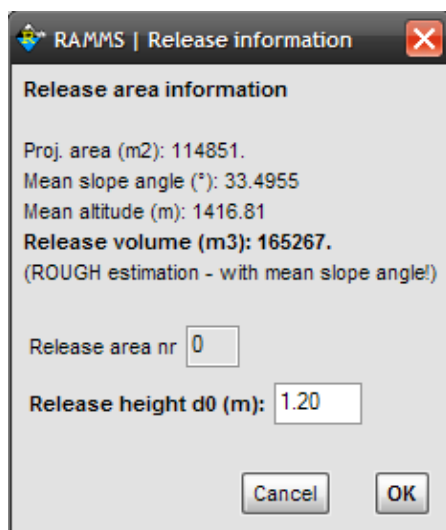
1. **Digitálny výškový model (DEM)** – reprezentuje topografiu povrchu a je kľúčovým prvkom ovplyvňujúcim presnosť výsledku. Použitý bol DEM s rozlíšením 2x2 m, čo umožňuje dostatočne presný výsledok. Model pracuje s DMR vo formáte *ESRI ASCII grid*, alebo *ASCII X,Y,Z*. [15]

2. **Vrstva lesného porastu** – obsahuje informácie o výskyte lesného porastu, ktorý môže brániť pri pohybe lavín a predstavovať treciu plochu. Pre výpočet v nástroji RAMMS však táto vrstva nie je povinná. Jej zahrnutím sa presnosť výsledku zvyšuje. Požadovaný formát pre vstup do výpočtu je ESRI ASCII Grid, v ktorom sú zastúpené 2 hodnoty (0: neprítomnosť lesa, 1: prítomnosť lesa)



Obr. 14: Vrstva lesného porastu v prostredí RAMMS (červená – les, biela – bez lesa, zdroj: autor)

3. **Informácie o odtrhu** – sú dôležitými údajmi pre výslednú presnosť modelovania a zahŕňajú odtrhy vo forme polygónov a ďalšie nastaviteľné parametre ako výška odtrhu či hustota snehu. Práve výška odtrhu určuje množstvo snehu, ktoré so sebou lavína ponesie od svojej iniciácie až po ukončenie. Pre zvolený odtrh v Prednej Úboči bola nastavená výška odtrhu 1,2 m. Po nastavení tejto výšky model vypočíta množstvo snehu v odtrhovej zóne. Hustota snehu zostala na implicitnej hodnote 300 kg/m^3 , čo predstavuje tvrdší doskový sneh.

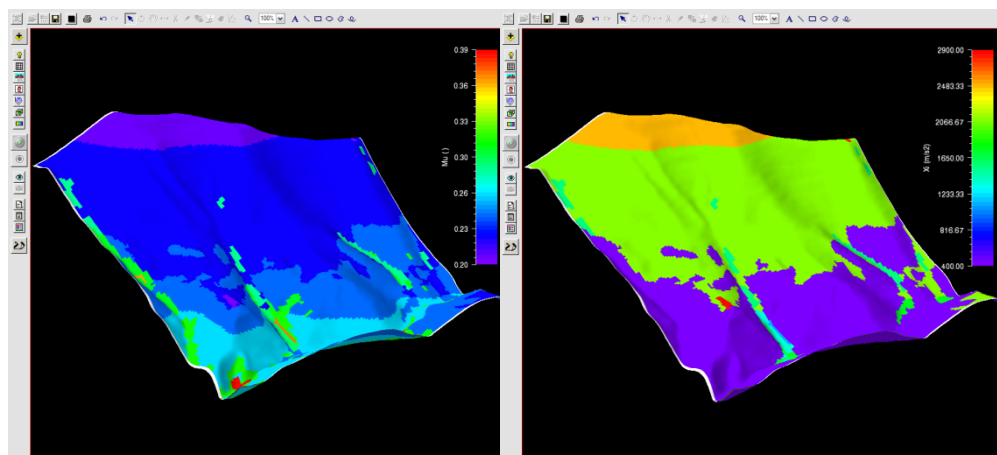


Obr. 15: Nastavenie výšky odtrhu a výpočet parametrov odtrhu, zdroj: autor



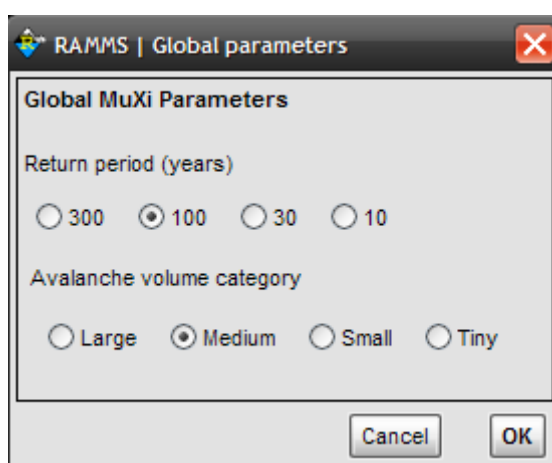
Obr. 16: Zvolený odtrh v Prednej Úboči, zdroj: autor

4. **Frikčné parametre** – sú vypočítané zo vstupných dát (DEM a vrstvy lesného porastu), prípadne je možný import existujúcej vrstvy s trecími parametrami. Po zvolení jedného zo spôsobov sú automaticky vypočítané frikčné parametre μ (μ) a ξ (ξ).



Obr. 17: Vypočítané frikčné parametre μ (μ) a ξ (ξ), zdroj: autor

5. **Globálne parametre a parametre výpočtu** – Nastavenie globálnych parametrov ovplyvňuje frikčné parametre μ (μ) a ξ (ξ) a predstavujú návratovú periódu a objemovú kategóriu simulovanej lavíny. Pre túto lavínu bola zvolená perióda 100 rokov a stredná objemová kategória. Pred vykonaním samotného výpočtu je nutné nastaviť názov výstupu, rozlíšenie rastra, čas simulácie a časový krok generovania výstupov. Pre vykonanú simuláciu boli nastavené nasledovne: rozlíšenie rastra: 2 m , čas simulácie: 300 s a časový skok generovania výstupov: 5 s.



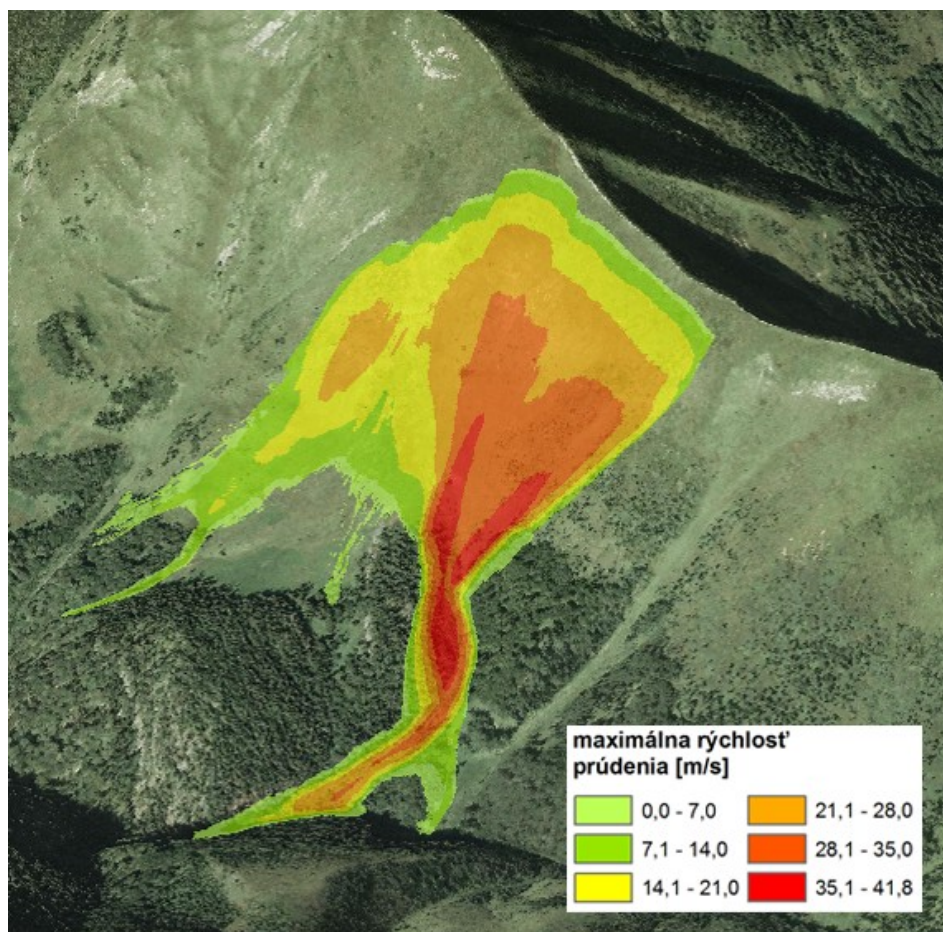
Obr. 18: Nastavenie globálnych parametrov, zdroj: autor

6.3.3. Výsledok simulácie v dynamickom modeli RAMMS

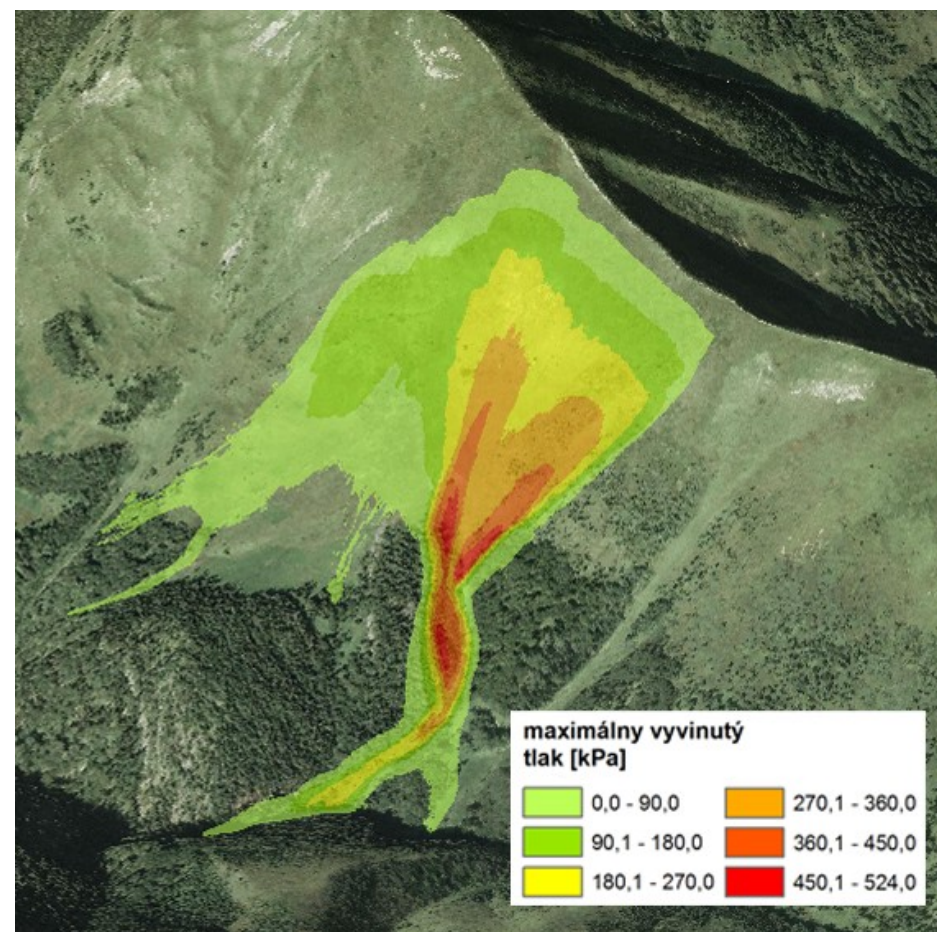
Výsledok simulácie v nástroji RAMMS umožňuje vytvoriť viacero druhov výstupov, ktoré je možné vizualizovať priamo v nástroji, alebo je možný export do formátu ESRI ASCII Grid a následná vizualizácia v ESRI ArcGIS.

Z výsledkov výpočtu boli pre zvolenú simuláciu exportované 4 parametre – maximálna rýchlosť prúdenia lavíny, maximálny vyvinutý tlak v priebehu prúdenia, maximálna výška snehu počas zosuvu a maximálna výška snehu v pásme nánosu.

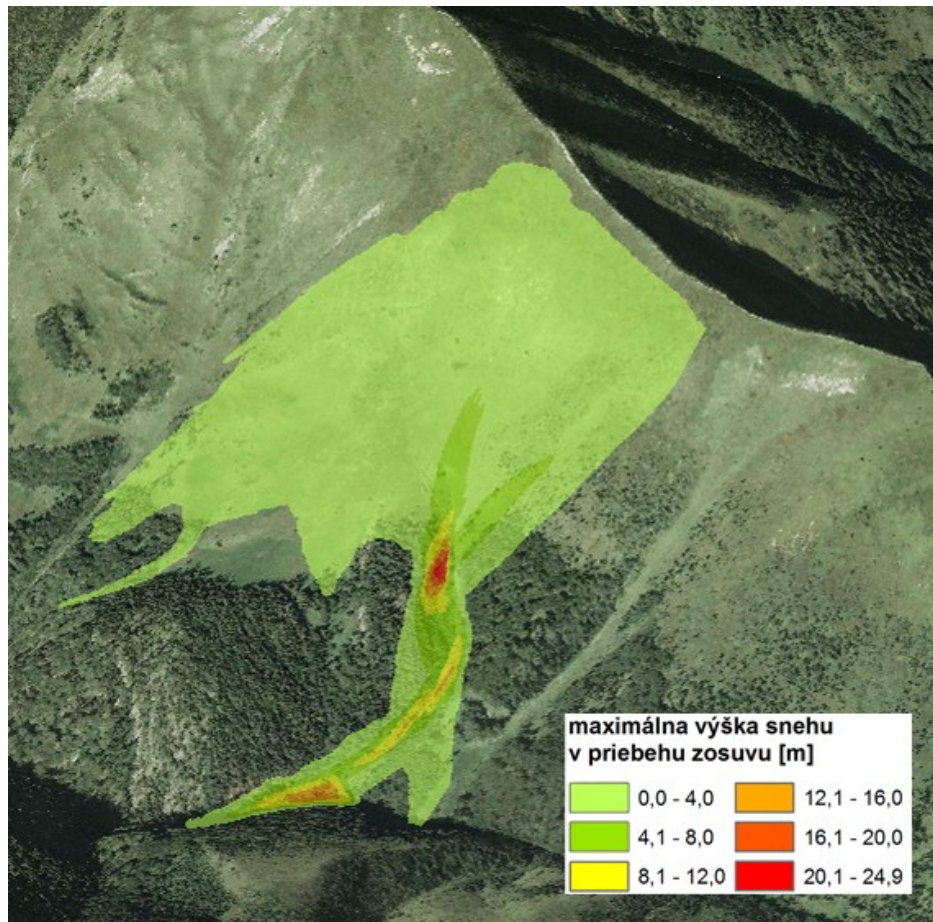
Výsledky simulácie ukázali, že lavína sa pri svojom zosuve rozdelí na 2 smery a tým vytvorí 2 lavínové dráhy. Najväčšiu rýchlosť dosiahla v žľaboch v pásme lesa, čo by malo v skutočnosti za následok úplne zničenie lesného porastu v miestach tejto lavínovej dráhy. Podľa výsledku by v tomto žľabe mala lavína maximálnu rýchlosť 41,8 m/s, teda 150,5 km/h s maximálnou výškou snehu 24,9 m a vyvinutým tlakom 524 kPa. V pásme nánosu dosiahla výška snehu podľa simulácie maximálnu hodnotu 13,6 m. Jednalo by sa teda o veľmi ničivú lavínu ohrozujúcu lesný porast a človeka pohybujúceho sa v teréne.



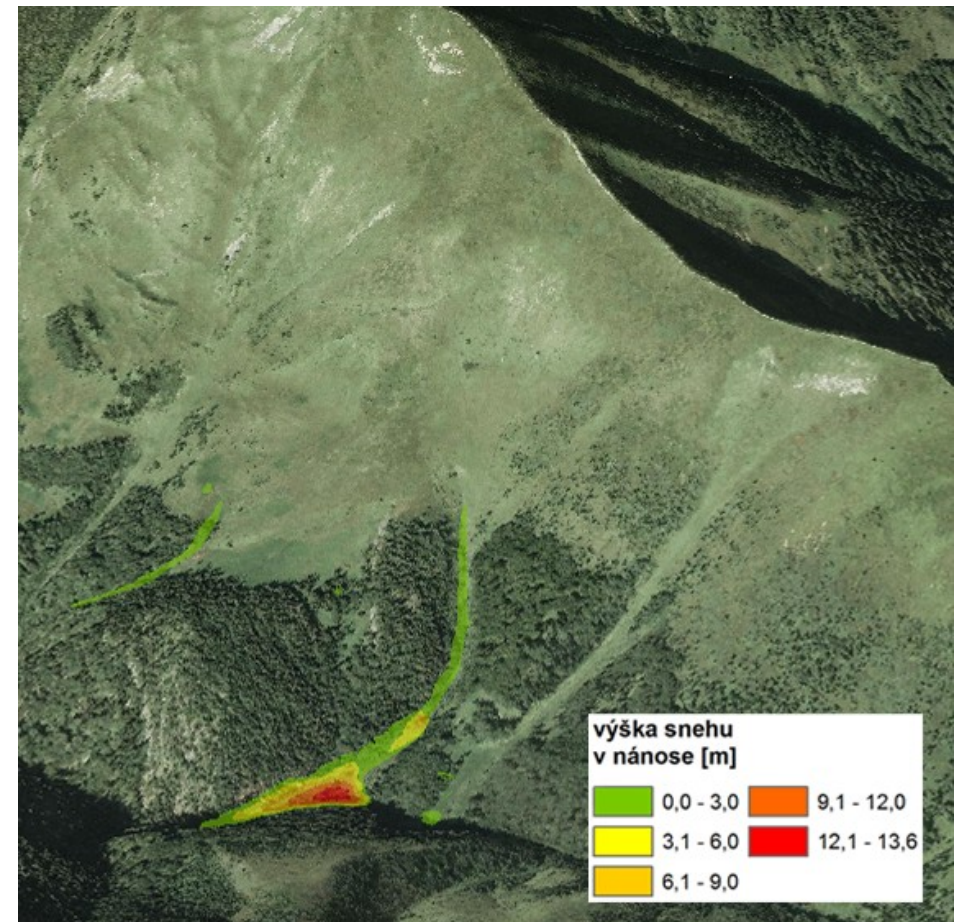
Obr. 19: Vypočítaná maximálna rýchlosť prúdenia snehových más v priebehu zosuvu, zdroj: autor



Obr. 20: Vypočítaný maximálny vyvinutý tlak v priebehu zosuvu, zdroj: autor



Obr. 22: Vypočítaná maximálna výška snehu v priebehu zosuvu, zdroj: autor



Obr. 21: Vypočítaná výška snehu v nánose, zdroj: autor

7. Záver

Cieľom spracováanej bakalárskej práce bolo zhodnotiť parametre reliéfu v doline Šútovského potoka a s využitím nástrojov GIS vykonať analýzu rizika vzniku lavínových javov. Prvým krokom bolo vytvorenie a príprava dát, ktoré umožnili odvodenie základných topografických charakteristík a ich následné využitie pre modelovanie potenciálnych odtrhových zón lavín prostredníctvom zvoleného modelu. Na základe výsledkov bola vytvorená mapa zobrazujúca riziko vzniku lavín a zaznamenané lavínové dráhy z lavínového katastra. Výsledok tejto analýzy je možné považovať za úspešný, keďže výsledky sa do značnej miery zhodovali so záznamami v lavínovom katastri. Boli však zistené aj miesta, ktoré neboli do súčasnosti zaznamenané ako oblasti, kde sa vyskytla lavínová udalosť. Jednou z možností nezhody s lavínovým katastrom mohla byť skutočnosť, že v súčasnosti je vegetácia rozdielna ako v minulosti, kedy došlo k záznamom do lavínového katastra. Získané výsledky analýzy je teda možné využiť pri lavínovej prevencii a znižovaní lavínového rizika v sledovanej oblasti a môžu slúžiť ako aktualizácia už existujúceho lavínového katastra.

V ďalšej časti bakalárskej práce bolo cieľom vykonať modelovanie a simuláciu dráhy a dosahu lavín, ktoré vypovedá o priebehu lavíny či jej dôsledkoch. Pre toto modelovanie bol použitý dynamický numerický model RAMMS, v ktorom bola po nastavení parametrov nasimulovaná lavína v Prednej Úboči. Výsledky tejto simulácie poskytli informácie o pohybe snehových más, ich množstve, rýchlosti či tlaku, podľa ktorých bolo zistené, že táto lavína by v skutočnosti spôsobila značné poškodenia lesného porastu a pri zasiahnutí osôb by mohla končiť tragicky.

Treba podotknúť, že táto práca poukázala na dôležitosť a opodstatnenie geografických informačných systémov v lavínovej problematike, na základe ktorých je možné stanoviť riziko vzniku lavín, či simulovať ich priebeh s cieľom vytvoriť podklady pre znižovanie nebezpečenstva vyplývajúceho z lavín a výsledky využiť pri lavínovej prevencii, a znižovať tak riziko vzniku prírodných a materiálnych škôd, či ohrozenia ľudí v horskom teréne.

8. Zoznam použitej literatúry

- [1] BÁRKA, I.; RYBÁR, R. Identifikácia miest vzniku lavín pomocou GIS. In *Nové trendy v krajinskej ekológii : Zborník z konferencie s medzinárodnou účasťou* [online]. UK, Bratislava : [s.n.], 2003
- [2] BISKUPIČ, Marek. *Modelovanie dosahu lavín s použitím GIS*. Praha, 2008. 98 s. Diplomová práca. Karlova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí.
- [3] BISKUPIČ, Marek; CHRUSTEK, Pawel; RICHNAVSKÝ, Jozef; LIZUCH, Milan. Extreme snow avalanche events in Tatra Mountains. In: *Forum Carpathicum 2010*. 15 - 19. 9. 2010, Krakow, Poľsko. Poster.
- [4] BISKUPIČ, Marek; CHRUSTEK, Pawel; RICHNAVSKÝ, Jozef; LIZUCH, Milan. Snow avalanche runout simulations of various events in Carpathian mountain range. In: *Forum Carpathicum 2010*. 15 - 19. 9. 2010, Krakow, Poľsko. Poster.
- [5] BISKUPIČ, Marek; RICHNAVSKÝ, Jozef; CHRUSTEK, Pawel; MATĚJÍČEK, Luboš; LIZUCH, Milan. Implementácia nástrojov ESRI za účelom stanovenia potenciálnych lavínových dosahov vo vybraných regiónoch Karpát. In: *Konferencia GIS ESRI 2010*. 3 - 4. 11. 2010, Praha. Poster.
- [6] GARGULÁK, Jozef; KRIŽO, Vladimír. *Malá Fatra : Turistický sprievodca ČSFR*. 3. novelizované vydanie. Bratislava : Šport, 1990. 288 s. ISBN 80-7096-089-2.
- [7] GARGULÁK, Jozef; KRIŽO, Vladimír. *Vrátna : Stručný sprievodca*. Bratislava : Šport, 1987. 128 s.
- [8] HREŠKO, J. Ohrozenosť vysokohorskej krajiny v oblasti Tatier. In *Acta Facultatis Stud. Hum. et Naturae Univ. Prešovensis : geographica 2, roč. XXIX*. [s.l.] : [s.n.], 1998. s. 326-328
- [9] CHRISTEN, Marc, et al. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop. September 21-27. Whistler, BC, CAN* : [s.n.], 2008. s. 709-716. Dostupné z WWW: <<http://ramms.slf.ch/ramms/images/stories/rammsissw08.pdf>>.
- [10] CHRISTEN, Marc, et al. *RAMMS User manual v 1.01 : A modeling system for snow-avalanches in research and practice* [online]. Davos, Švajčiarsko : WSL Institute for

Snow and Avalanche Research SLF, marec 2010 [cit. 2010-08-30]. Dostupné z WWW: <<http://ramms.slf.ch/ramms/downloads/rammsmanual.pdf>>.

- [11] KREMPASKÝ, Ján. V Tatrách dnes môžu padať lavíny. *SME* [online]. 12.2.2009, [cit. 2011-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.sme.sk/c/4305122/v-tatrach-dnes-mozu-padat-laviny.html>>.
- [12] LIZUCH, Milan . *ABC lavín*. [s.l.] : Horský internetový klub, 2009. 78 s. ISBN 978-80-970269-5-0.
- [13] MCCLUNG, David; SCHAERER, Peter. *The Avalanche handbook*. Seattle, USA : The mountaineers books, 2006. 342 s. ISBN 13:987-0-89886-809-8.
- [14] MILAN, Ladislav. *Lavíny v horstvách Slovenska*. Prvé vydanie. Bratislava : VEDA (Slovenská akadémia vied), 2006. 152 s. ISBN 80-224-0894-8.
- [15] MILAN, Ladislav; ŠRAMKA, Štefan . *Nebezpečenstvo lavín*. Prvé vydanie. Bratislava : Šport, 1988. 152 s.
- [16] PAGÁČ, Ján, et al. *Malá Fatra : Chránená krajinná oblasť*. Prvé vydanie. Bratislava : Príroda, 1983. 356 s. ISBN 64-023-83.
- [17] PAGÁČ, Ján; VANOCHOVÁ, Mária . *Príroda okresu Žilina a jej ochrana*. 1. vydanie. Martin : Osveta, 1985. 192 s.
- [18] PODOBNIKAR, Tomaž; STANČIČ, Zoran; OŠTIR, Krištof. Definition of the terms DEM / DTM. In *Data integration for DTM production* [online]. Ljubljana : Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, 2000 [cit. 2011-03-10]. Dostupné z WWW: <http://iaps.zrc-sazu.si/files/File/Publikacije/Data_integration_for_DTM_production_ISPRS.pdf>.
- [19] RICHNAVSKÝ, Jozef. *Geomorfológia : Predpoklad reliéfu vybraných regiónov Moravsko-sliezskych Beskýd pre výskyt lavín*. [s.l.], 2010. 23 s. Semestrální práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Hornicko - geologická fakulta.
- [20] RICHNAVSKÝ, Jozef; BISKUPIČ, Marek; MUDROŇ, Ivan; DEVEČKA, Branislav; UNUCKA, Jan; CHRUSTEK, Pawel; LIZUCH, Milan; KYZEK, Filip; MATĚJÍČEK, Luboš. Using modern GIS tools to reconstruct the avalanche: A case study of Magurka 1970. In *Sborník - Symposium GIS Ostrava 2011*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011. Dostupné z WWW: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2011/sbornik/papers/Richnavsky.pdf>

- [21] RICHNAVSKÝ, Jozef; BISKUPIČ, Marek; ŠÍR, Boris; BOBÁL, Peter; UNUCKA, Jan. Modelovanie lavín vo vybraných lokalitách Moravskosliezskych Beskýd. In *Sborník konferenčních příspěvků ČGS 2010*, Ostrava: Ostravská univerzita.

Internetové zdroje:

- [22] *Avalanche.sk* [online]. 2008 [cit. 2011-03-11]. Dostupné z WWW: <www.avalanche.sk>.
- [23] *Geografické informační systémy* [online]. [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.arcdata.cz/>>.
- [24] *LAVÍNY.sk* [online]. 2005 [cit. 2011-03-10]. Dostupné z WWW: <www.laviny.sk>.
- [25] *Malá Fatra* [online]. 2008 [cit. 2011-03-07]. Územie. Dostupné z WWW: <<http://www.malafatra.org/uzemie/>>.
- [26] *Poznaj Slovensko* [online]. 2009 [cit. 2011-03-08]. NP Malá Fatra. Dostupné z WWW: <<http://www.poznajslovensko.sk/narodny-park-mala-fatra>>.
- [27] *Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky* [online]. [cit. 2011-03-10]. Národný park Malá Fatra. Dostupné z WWW: <<http://www.sopsr.sk/malafatra/>>.
- [28] *VRÁTNA Free Time Zone* [online]. 2008 [cit. 2011-03-07]. NP Malá Fatra. Dostupné z WWW: <www.vratna.sk>.

9. Zoznam použitých obrázkov

Obr. 1: NP Malá Fatra v rámci celej Slovenskej republiky a Žilinského kraja	12
Obr. 2: Oblé tvary vrcholu Stoh, v pozadí dominantný Rozsutec	14
Obr. 3: Striedanie členitých a zaoblených tvarov reliéfu	15
Obr. 4: Svahy porastené dlhou uľahnutou trávou v severnej časti doliny	18
Obr. 5: Základové lavíny na trávnatých svahoch Stien, v pozadí vrchol Stoh	20
Obr. 6: Rozdelenie lavíny podľa pásiem	28
Obr. 7: Klasifikácia lavín podľa typu odtrhu	29
Obr. 8: Klasifikácia lavín podľa formy pohybu	30
Obr. 9: Postup prípravy dát	32
Obr. 10: Záznamy z lavínovej databázy pre Šútovskú dolinu	35
Obr. 11: Výška nového snehu a celkovej výšky snehovej pokrývky - zima 2004/2005, Chata pod Chlebom	36
Obr. 12: Postup výpočtu výsledného lavínového ohrozenia	42
Obr. 13: Vytvorené odtrhové polygóny z vypočítaného lavínového ohrozenia	45
Obr. 14: Vrstva lesného porastu v prostredí RAMMS	46
Obr. 15: Nastavenie výšky odtrhu a výpočet parametrov odtrhu	46
Obr. 16: Zvolený odtrh v Prednej Úboči	46
Obr. 17: Vypočítané frikčné parametre μ (Mu) a ξ (Xi)	47
Obr. 18: Nastavenie globálnych parametrov	47
Obr. 19: Vypočítaná maximálna rýchlosť prúdenia snehových más	49
Obr. 20: Vypočítaný maximálny vyvinutý tlak v priebehu zosuvu	49
Obr. 21: Vypočítaná maximálna výška snehu v priebehu zosuvu	50
Obr. 22: Vypočítaná výška snehu v nánose	50

10. Zoznam grafov a tabuliek

Graf 1: Priemerná výška snehovej pokrývky a priemerná výška denného snehového maxima podľa jednotlivých mesiacov – dvadsaťročný priemer (1991-2010).....	16
Graf 2: Priemerné mesačné teploty pre roky 2002-2010.....	17
Graf 3: Výskyt lavínových udalostí v jednotlivých rokoch v intervale 1992-2009.....	35
Graf 4: Výskyt lavín podľa nadmorskej výšky	36
Graf 5: Výskyt lavín podľa expozície reliéfu	37
Graf 6: Percentuálne zastúpenie lavín podľa expozície reliéfu	37
Tab. 1: Lavínové prípady s účasťou osôb v Malej Fatre	19
Tab. 2: Kategorizácia svahov podľa výskytu lavín	22
Tab. 3: Klasifikácia vlhkosti snehu	25
Tab. 4: Reklasifikácia hodnôt sklonu	39
Tab. 5: Reklasifikácia hodnôt horizontálneho zakrivenia	39
Tab. 6: Reklasifikácia hodnôt vertikálneho zakrivenia	39
Tab. 7: Reklasifikácia faktoru drsnosti povrchu	40
Tab. 8: Reklasifikácia hodnôt nadmorskej výšky	41
Tab. 9: Reklasifikácia faktoru expozície terénu.....	41
Tab. 10: Reklasifikácia hodnôt výsledku	43